



UNIVERSITAS INDONESIA

**AMELIORASI KUALITAS LIMBAH CAIR DARI PABRIK
KELAPA SAWIT DENGAN PEROKSON SEBAGAI
*ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOP)***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

WIDIOSENO SUMARAH ADIMUKTI

0806456884

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**AMELIORASI KUALITAS LIMBAH CAIR DARI PABRIK
KELAPA SAWIT DENGAN PEROKSON SEBAGAI
*ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOP)***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

WIDIOSENO SUMARAH ADIMUKTI

0806456884

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

DEPOK

JUNI 201

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Widioseno Sumarah Adimukti

NPM : 0806456884

Tanda Tangan : 

Tanggal : 15 Juni 2011

z

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Widioso Sumarah Adimukti
NPM : 0806456884
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Ameliorasi Kualitas Limbah Cair Dari Pabrik Kelapa Sawit Dengan Perokson Sebagai *Advanced Oxidation Process* (AOP)

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Setjo Bismo, DEA ()
Penguji : Rya Fathul Karamah S.T., M.T ()
Penguji : Dr. Ing. Donni Adinata S.T., M.Eng.Sc ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho W., M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi dengan judul **“Ameliorasi Kualitas Limbah Cair Dari Pabrik Kelapa Sawit Dengan Perokson Sebagai *Advanced Oxidation Process (AOP)*”** untuk memenuhi tugas skripsi, salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

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

- (1) Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan seminar ini;
- (2) Eva Fathul Karamah S.T., M.T, selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu permasalahan akademik perkuliahan selama ini;
- (3) Ir. Yuliusman M.Eng selaku kordinator seminar Teknik Kimia FTUI;
- (4) Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan wawasannya;
- (5) Orangtua yang selalu memberi dukungan dan semangat baik berupa moral maupun materi selama mengerjakan kuliah dan skripsi ini;
- (6) Mas Ardha dan Mbak Novi yang memberikan bantuan dan dukungan selama kuliah di Teknik Kimia dan pengerjaan skripsi;
- (7) Mbak Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, dan Mas Taufik atas bantuannya pada saat penulis melakukan penelitian;
- (8) Veny, Ika, Wiwi, Cristin, Fatimah, Ria, Fika, Indi dan Migel selaku rekan penelitian satu bimbingan;
- (9) Anjang, Bulake dan Arief selaku rekan-rekan seperjuangan di kosan yang selalu memberikan bantuan serta dukungan;

- (10) Teman-teman katek belakang yang selalu memberikan warna bagi kehidupan penulis selama kuliah di Teknik Kimia FTUI;
- (11) Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah seminar ini secara langsung maupun tidak langsung;

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

Depok, 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 : Widioso Sumarah Adimukti
NPM : 0806456884
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:

**Ameliorasi Kualitas Limbah Cair Dari Pabrik Kelapa Sawit Dengan Perokson Sebagai
*Advanced Oxidation Process (AOP)***

Beserta persangkat 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 : 15 Juni 2012
Yang menyatakan



(Widioso Sumarah Adimukti)

ABSTRAK

Nama : Widioseno Sumarah Adimukti
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Penelitian : Ameliorasi Kualitas Limbah Cair Dari Pabrik Kelapa Sawit
Dengan Perokson Sebagai *Advanced Oxidation Process* (AOP)

Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit dengan menggunakan proses perokson, yaitu suatu proses AOP (Proses Oksidasi Lanjut) yang menggabungkan ozon dan hidrogen peroksida sebagai oksidator. Reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor hibrida ozon-plasma (RHOP). Variasi yang digunakan untuk melakukan uji kinerja proses perokson ini adalah tegangan pada transformator tegangan tinggi dan rasio hidrogen peroksida terhadap ozon. Sebelum dilakukan proses perokson, terlebih dahulu dilakukan pengambilan data tentang kandungan COD, TSS dan fenol pada limbah cair tersebut. Setelah itu, diukur juga kandungan COD, TSS dan fenol setelah perlakuan untuk mengetahui efektifitas dari proses perokson yang digunakan. Dari penelitian ini didapatkan bahwa proses perokson tidak berpengaruh untuk memperbaiki kandungan TSS dan kurang baik untuk memperbaiki kandungan fenol pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit, namun cukup baik untuk memperbaiki kandungan COD yaitu dengan efektifitas sebesar 75,59% pada tegangan 11 kV dan rasio hidrogen peroksida – ozon sebesar 0,4.

Kata kunci: COD, TSS, fenol, perokson, RHOP

ABSTRACT

Name : Widioseno Sumarah Adimukti
Study Program : Chemical Engineering
Title : Amelioration of The Palm Oil Plant Wastewater Quality
using Peroxone – Advanced Oxidation Process (AOP)

The aim of this research is to improve the palm oil plant wastewater quality using peroxone, an AOP (Advanced Oxidation Process) which combines ozone and hydrogen peroxide as an oxidant. The reactor used in this research is Ozone-Plasma Hybrid Reactor (RHOP). In this research, voltage at the high voltage transformer and the ratio of hydrogen peroxide to ozone were varied. Prior to the peroxone process, first performed the data retrieval of COD, TSS and phenol content of the wastewater. Then, measurement on COD, TSS, and phenol content has been executed after doing a treatment to determine the effectiveness of the peroxone process. From this research, it was found that the peroxone process has no effect to degrade the TSS content and less well to degrade the content of phenol, but good enough to degrade COD content with the effectiveness of 75.59% at a voltage of 11 kV and the ratio of hydrogen peroxide - ozone at 0.4.

Keyword: COD, TSS, phenol, peroxone, RHOP

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kelapa Sawit dan Pabrik Kelapa Sawit (PKS).....	5
2.2 Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit.....	7
2.3 Ozon Sebagai Oksidator.....	8
2.4 Peran Plasma dalam Proses Ameliorasi	10
2.4.1 Plasma Secara Umum	11
2.4.2 Jenis-jenis Plasma	11
2.5 Hidrogen Peroksida dan Perokson dalam Proses Oksidasi	15
2.5.1 Hidrogen Peroksida.....	16
2.5.2 Perokson.....	17
2.6 Penentuan Kadar <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	22
2.7 Penentuan Kadar Total Suspended Solid (TSS).....	22
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Diagram Alir Penelitian	23
3.1.1 Tahapan Pendahuluan	24

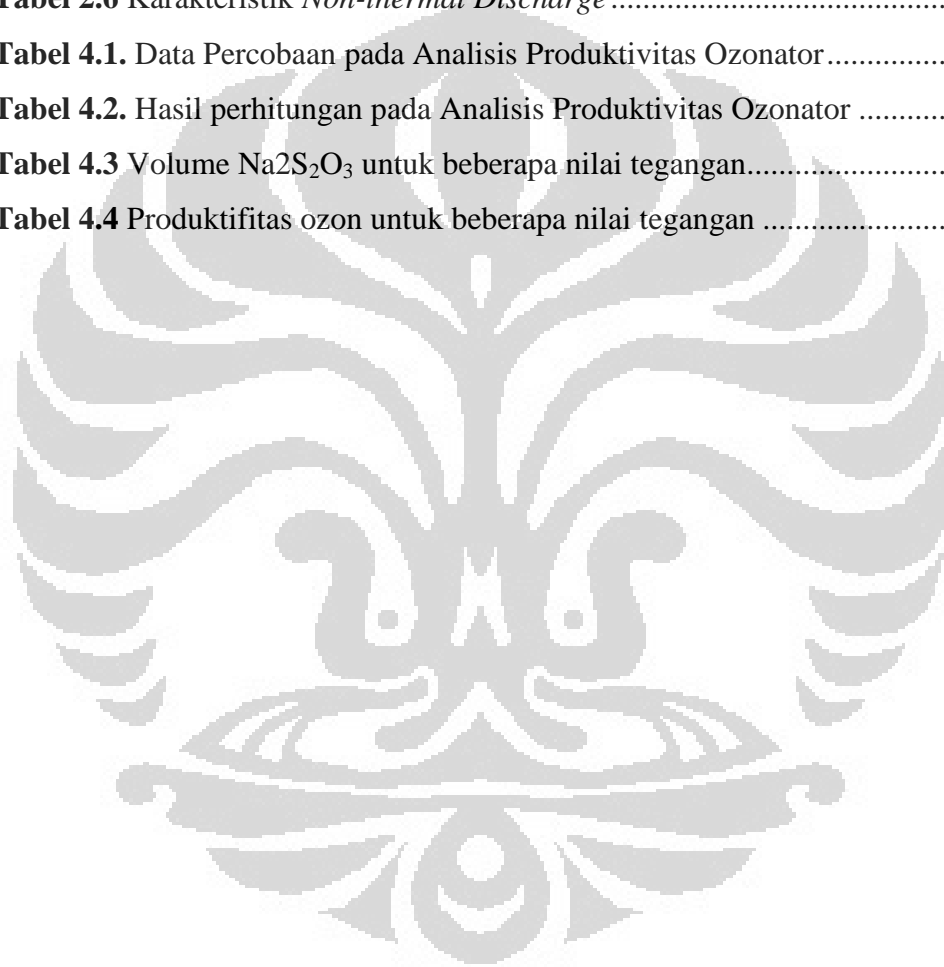
3.1.2 Penelitian dengan proses perokson	24
3.2 Rancangan Penelitian	25
3.2.1 Peralatan yang digunakan dalam Penelitian.....	26
3.2.2 Perangkaian dan Pengujian Reaktor Pengolahan Limbah	30
3.2.3 Preparasi atau Penyiapan Sampel	30
3.3 Prosedur Percobaan.....	32
3.3.1 Variasi dalam Penelitian	32
3.3.2 Prosedur Penentuan Produktifitas Ozon.....	32
3.3.3 Prosedur Penentuan Rasio H_2O_2/O_3	33
3.3.4 Prosedur Penentuan Kandungan Fenol	33
3.3.5 Kurva Kalibrasi Fenol	34
3.3.6 Prosedur Percobaan dengan Perokson	35
3.4 Analisis dan perhitungan Data Penelitian	35
3.4.1 Perhitungan Konversi.....	35
3.4.2 Perhitungan Produktifitas Ozon	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Uji Kinerja Awal Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP).....	37
4.1.1 Analisis Keselamatan Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP).....	37
4.1.2 Uji Kinerja Ozonator Reson.....	38
4.1.3 Pengamatan Fenomena Plasma-Ozon.....	40
4.2 Proses Perokson untuk Ameliorasi Limbah Cair PKS	43
4.2.1 Pengaruh Tegangan Pada Transformator Terhadap Proses Perokson..	44
4.2.2 Pengaruh Rasio H_2O_2/O_3 Terhadap Proses Perokson.....	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	68
5.1 Kesimpulan	68
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN.....	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2 Skematis Alat Percobaan	25
Gambar 3.3 Pompa	27
Gambar 3.4 Amperemeter	28
Gambar 3.5 Voltmeter	28
Gambar 3.6 Flowmeter cairan	29
Gambar 3.7 Injektor.....	29
Gambar 3.8 Ozonator	30
Gambar 3.9 Alat pengambil sampel bertangkai panjang.....	31
Gambar 3.10 Alat pengambil sampel berupa botol	31
Gambar 4.1 Degradasi COD pada Rasio sebesar 1	46
Gambar 4.2 Degradasi COD pada Rasio sebesar 0,8	47
Gambar 4.3 Degradasi COD pada Rasio sebesar 0,6	48
Gambar 4.4 Degradasi COD pada Rasio sebesar 0,4	49
Gambar 4.5 Degradasi TSS pada Rasio sebesar 1	50
Gambar 4.6 Degradasi TSS pada Rasio sebesar 0,8.....	51
Gambar 4.7 Degradasi TSS pada Rasio sebesar 0,6.....	52
Gambar 4.8 Degradasi TSS pada Rasio sebesar 0,4.....	53
Gambar 4.9 Mekanisme reaksi penyisihan fenol oleh radikal hidroksil	54
Gambar 4.10 Degradasi Fenol pada Rasio sebesar 1	55
Gambar 4.11 Degradasi Fenol pada Rasio sebesar 0,8	56
Gambar 4.12 Degradasi Fenol pada Rasio sebesar 0,6	57
Gambar 4.13 Degradasi Fenol pada Rasio sebesar 0,4	58
Gambar 4.14 Degradasi COD pada Tegangan 9,5 kV	60
Gambar 4.15 Degradasi COD pada Tegangan 11 kV	61
Gambar 4.16 Degradasi TSS pada Tegangan 9,5 kV	62
Gambar 4.17 Degradasi TSS pada Tegangan 11 kV	63
Gambar 4.18 Degradasi Fenol pada Tegangan 9,5 kV.....	65
Gambar 4.19 Degradasi Fenol pada Tegangan 11 kV.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik Limbah PKS dan Baku Mutu Limbah	7
Tabel 2.2 Oksidator dan Potensial Oksidasinya	9
Tabel 2.3 Kelarutan Ozon dan Oksigen dalam Air	10
Tabel 2.4 Perbedaan Fasa Padat, Cair, Gas, dan Plasma	11
Tabel 2.5 Klasifikasi Plasma berdasarkan Temperatur	13
Tabel 2.6 Karakteristik <i>Non-thermal Discharge</i>	14
Tabel 4.1. Data Percobaan pada Analisis Produktivitas Ozonator	39
Tabel 4.2. Hasil perhitungan pada Analisis Produktivitas Ozonator	40
Tabel 4.3 Volume $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ untuk beberapa nilai tegangan.....	42
Tabel 4.4 Produktivitas ozon untuk beberapa nilai tegangan	43



DAFTAR LAMPIRAN

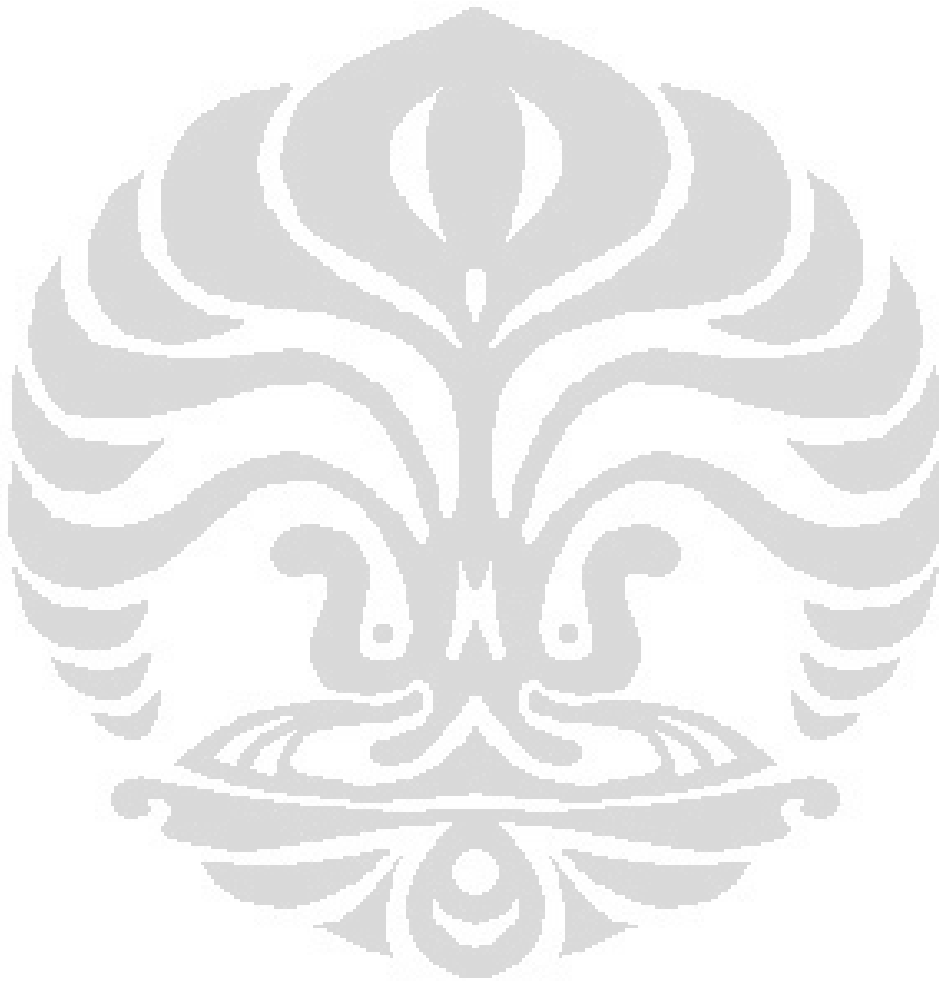
Lampiran 1. Kurva Kalibrasi Fenol

Lampiran 2. Data Penelitian Uji COD

Lampiran 3. Data Penelitian Uji TSS

Lampiran 4. Data Penelitian Uji Fenol

Lampiran 5. Pengukuran Produktivitas Ozonator Reson RSO 9805 2.8 g dengan
Metode Iodometri



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kelapa sawit mempunyai beberapa manfaat dan kegunaan dimana salah satunya adalah sebagai minyak kelapa sawit. Minyak kelapa sawit berkembang cukup pesat karena merupakan salah satu komoditi ekspor Indonesia. Namun, pabrik kelapa sawit (PKS) merupakan salah satu industri yang sarat dengan residu pengolahan (Siregar, 2009). Limbah cair dari PKS merupakan sumber pencemaran yang potensial bagi manusia dan lingkungan, sehingga limbah ini perlu diolah agar nantinya aman apabila dibuang ke lingkungan.

Jumlah limbah cair yang dihasilkan oleh PKS berkisar antara 600-700 liter/ton tandan buah segar (Naibaho, 1999). Saat ini diperkirakan jumlah limbah cair yang dihasilkan oleh PKS di Indonesia mencapai 28,7 juta ton (Isroi, 2008). Limbah cair PKS ini mengandung bahan organik yang tinggi sehingga akan sangat berpotensi untuk mencemari lingkungan.

Karakteristik limbah cair PKS meliputi pH sebesar 4,10, BOD 212,8 mg/L, COD 347,2 mg/L, TSS 211,7 mg/L, kandungan nitrogen total 41 mg/L, dan *oil and grease* 31 mg/L (Amaru, 2008). Sedangkan baku mutu limbah yang dibuang ke lingkungan harus memenuhi syarat dengan ambang batas pH antara 6-9, BOD 110 mg/L, COD 250 mg/L, TSS 100 mg/L, kandungan nitrogen total 20 mg/L, dan *oil and grease* 30 mg/L (Kepmen LH Nomor 51/MEN LH/10/1995). Berdasarkan data ini, maka semua parameter limbah cair PKS berada diatas ambang batas baku mutu limbah.

Sejauh ini sudah digunakan beberapa metode untuk pengolahan limbah cair PKS, salah satunya adalah dengan menggunakan metode proses kombinasi anaerobik dan aerobik (Naibaho, 1996). Metode ini mempunyai kelebihan pengolahannya cukup murah, tetapi kekurangannya adalah lahan yang digunakan untuk pengolahan limbah cair cukup besar (Agustina, dkk, 2008). Pengolahan limbah cair PKS dapat juga menggunakan teknologi pemisahan membran (Agustina, dkk, 2008). Kelebihan dari metode ini adalah tidak membutuhkan lahan yang luas dan konsumsi energinya relatif lebih rendah, namun

kekurangannya adalah fluks dan selektifitas karena pada proses membran umumnya terjadi fenomena fluks berbanding terbalik dengan selektifitas, yaitu semakin tinggi fluks akan berakibat menurunnya selektifitas dan sebaliknya. Sedangkan hal yang diinginkan dalam proses berbasis membran adalah mempertinggi fluks dan selektifitas.

Pengolahan limbah cair juga dapat dilakukan dengan teknik ozonasi. Ozonasi ini dapat menghasilkan ion hidroksil yang dapat mengoksidasi senyawa organik yang terdapat di dalam limbah cair. Pemanfaatan teknik ozonasi sendiri sudah sangat banyak, antara lain adalah untuk pengolahan limbah seperti air limbah lumpur aktif (Yasui, 1994), penyisihan molekul organik (fenol, sianida dan pestisida) pada limbah industri (Bismo, 1999) dan limbah cair pabrik kertas (Terry, 2010). Untuk meningkatkan pembentukan hidroksil radikal pada ozon, dapat dilakukan dengan *Advanced Oxidation Process* dimana salah satunya adalah mengkombinasikan teknik ozonasi dengan hidrogen peroksida. Metode ini sering disebut dengan perokson. Perokson sudah diaplikasikan untuk oksidasi *methyl tertiary butyl ether* pada air tanah (Laing, 1999) dan pengolahan air minum (Sommer, 2004) serta untuk pengolahan limbah pabrik botol (Lan, 2008). Sudah banyak aplikasi dan penelitian tentang perokson namun belum ada yang mengaplikasikan untuk pabrik kelapa sawit (PKS).

Pada penelitian ini, akan digunakan teknik ozonasi dan penambahan hidrogen peroksida pada limbah cair yang diuji untuk memecah komponen organik pada limbah cair PKS sehingga kandungan COD, TSS atau parameter yang lainnya dapat diperbaiki. Prinsip kerjanya adalah dengan cara mengontakkan sampel limbah cair PKS dengan ozon dan kemudian menambahkan hidrogen peroksida sehingga zat organik dari limbah cair bisa dipecah menjadi zat-zat yang tidak berbahaya. Penelitian ini difokuskan untuk melakukan intensifikasi proses perokson yang akan digunakan untuk pengolahan limbah cair PKS.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, maka rumusan masalah untuk penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengaplikasikan proses perokson untuk memperbaiki kualitas limbah cair pabrik kelapa sawit dalam skala laboratorium.
2. Bagaimana efektifitas Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP) dalam memperbaiki kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit dengan menggunakan proses perokson.
3. Bagaimana pengaruh tegangan pada ozonator dan rasio H_2O_2/O_3 terhadap kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit setelah proses perokson.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menguji kinerja Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP) untuk proses perokson dan melakukan analisis terhadap perbaikan kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit sehingga nantinya dapat disimpulkan efektifitas proses perokson yang digunakan.
2. Mengetahui pengaruh variasi tegangan pada ozonator dan rasio H_2O_2/O_3 terhadap kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit setelah proses perokson.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Limbah cair yang digunakan adalah limbah cair yang berasal dari pabrik kelapa sawit di daerah Malimping, Pandeglang, Provinsi Jawa Barat.
2. Alat yang digunakan untuk menghasilkan ozon adalah Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP) yang dirancang oleh Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA di lab intensifikasi proses DTK FTUI.
3. Proses dilakukan secara *semi-batch* atau aliran secara sirkulasi, sedangkan oksidator ditambahkan secara kontinyu.
4. Sumber tegangan pada ozonator yang digunakan yaitu sumber listrik tegangan tinggi arus bolak-balik 220 V dari PLN.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan makalah seminar ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penulisan masalah, selain itu juga memuat perumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan makalah.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori yang berhubungan dengan limbah kelapa sawit, teknik ozonasi, plasma, proses perokson, serta COD dan TSS pada limbah cair.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode, alat, dan prosedur yang akan digunakan untuk melakukan proses perokson dan reaktor yang digunakan untuk memperbaiki kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit.

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 II

TINJAUAN PUSTAKA

Sesuai dengan uraian yang disampaikan pada Bab I sebelumnya, bahwa inti pekerjaan/penelitian ini adalah untuk mengaplikasikan proses perokson dalam pengolahan limbah cair dari pabrik kelapa sawit dan mencari kondisi operasi yang paling optimum dari proses ini. Untuk melakukan penelitian tersebut diperlukan beberapa pendukung literatur atau pustaka yang berkaitan dengan limbah cair pabrik kelapa sawit seperti karakteristik dan baku mutu limbah agar aman dibuang ke lingkungan serta pengolahan limbah cair ini sendiri.

Sedangkan yang berhubungan dengan teknologi plasma dan atau ozon yang digunakan dalam penelitian ini, secara garis besar meliputi: sifat fisika dan kimia ozon, jenis-jenis plasma serta proses perokson sebagai *Advanced Oxidation Process (AOP)*.

Pada paragraf-paragraf di bawah ini akan disajikan berbagai literatur, sitasi dan pustaka dari penelitian ini, termasuk “*state of the art*” dan perkembangan penelitian yang telah dicapai sampai saat ini.

2.1 Kelapa Sawit dan Pabrik Kelapa Sawit (PKS)

Tanaman kelapa sawit mempunyai bentuk seperti tanaman palem-paleman lainnya, yaitu daunnya merupakan tipe daun majemuk. Daun berwarna hijau tua dan pelepahnya berwarna sedikit lebih muda. Penampilannya sangat mirip dengan tanaman salak, hanya saja dengan duri yang tidak terlalu keras dan tajam.

Kelapa sawit ini dapat diambil minyaknya dan minyak kelapa sawit ini merupakan salah satu komoditi ekspor Indonesia. Oleh karena itu, kelapa sawit banyak dikembangkan. Minyak kelapa sawit adalah lemak semi padat yang mempunyai komposisi tetap.

Pabrik kelapa sawit sendiri merupakan suatu pabrik yang menghasilkan limbah dengan potensi sebagai sumber pencemaran bagi manusia maupun lingkungan. Limbah cair yang dihasilkan oleh PKS berasal dari air kondensat pada proses sterilisasi, air dari proses klarifikasi, air hydrocyclone (*claybath*), dan air pencucian pabrik. Jumlah air buangan tergantung pada sistem pengolahan,

kapasitas olah pabrik, dan keadaan peralatan klarifikasi. Limbah cair PKS mengandung bahan organik yang relatif tinggi dan tidak bersifat toksik karena tidak menggunakan bahan kimia dalam proses ekstraksi minyak.

Secara umum, yang disebut limbah adalah kotoran atau buangan yang merupakan komponen penyebab pencemaran terdiri dari zat atau bahan yang tidak mempunyai kegunaan lagi bagi masyarakat (Agustina dkk, 2008). Bentuk limbah tersebut dapat berupa gas dan debu, cair atau padat. Parameter yang menggambarkan karakteristik limbah terdiri dari sifat fisik, kimia, dan biologi. Karakteristik limbah berdasarkan sifat fisik meliputi suhu, kekeruhan, bau, dan rasa, berdasarkan sifat kimia meliputi kandungan bahan organik, protein, BOD, *chemical oxygen demand* (COD), sedangkan berdasarkan sifat biologi meliputi kandungan bakteri patogen dalam air limbah (Wibisono, 1995). Karakteristik limbah yang dihasilkan PKS dan baku mutu limbah adalah sebagai berikut.

Limbah cair dari pabrik kelapa sawit mengandung banyak senyawa organik seperti protein, lemak dan karbohidrat. Protein adalah senyawa organik kompleks berbobot molekul tinggi yang merupakan polimer dari monomer-monomer asam amino yang dihubungkan satu sama lain dengan ikatan peptida. Molekul protein mengandung karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan kadang kala sulfur serta fosfor.

Lemak sendiri mempunyai struktur molekul yang kaya akan rantai unsur karbon ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$) maka lemak mempunyai sifat hydrophob. Ini menjadi alasan yang menjelaskan sulitnya lemak untuk larut di dalam air. Lemak dapat larut hanya di larutan yang apolar atau organik seperti: eter, Chloroform, atau benzol. Sedangkan karbohidrat merupakan persenyawaan antara karbon, hidrogen dan oksigen yang terbentuk di alam dengan rumus umum $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_n$. Karbohidrat mengandung gugus fungsi karbonil (sebagai aldehida atau keton) dan banyak gugus hidroksil. Senyawa – senyawa organik yang terkandung di dalam limbah cair ini akan mempengaruhi karakteristik limbah seperti pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1. Karakteristik Limbah PKS dan Baku Mutu Limbah

Parameter	Limbah PKS	Baku Mutu Limbah
pH	4,10	6-9
BOD (mg/L)	212,80	110
COD (mg/L)	347,20	250
TSS (mg/L)	211,70	100
Kandungan Nitrogen Total (mg/L)	41	20
<i>Oil and Grease</i> (mg/L)	31	30

Sumber: Amaru, 2008 (*Limbah PKS*) dan Kepmen LH Nomor 51/MEN LH/10/1995 (*Baku Mutu Limbah*)

Berdasarkan data ini, maka semua parameter limbah cair PKS berada diatas ambang batas baku mutu limbah dan akan berbahaya apabila langsung di buang ke lingkungan sehingga perlu untuk diolah terlebih dahulu.

2.2 Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

Limbah cair yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit mengandung bahan organik yang berpotensi untuk mencemari lingkungan sehingga perlu dilakukan pengolahan supaya dapat dengan aman dibuang ke lingkungan. Metode pengolahan limbah dapat dilakukan secara fisika, kimiawi, dan biologi. Pengolahan limbah secara kimiawi dilakukan dengan proses koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan flotasi. Proses kimia sering kurang efektif karena pembelian bahan kimianya yang cukup tinggi dan menghasilkan *sludge* dengan volume yang cukup besar. Sedangkan pengolahan limbah secara biologis dapat dilakukan dengan proses aerob dan anaerob (Siregar, 2009). Pengolahan limbah dengan cara konvensional ini membutuhkan dana yang tidak besar namun kelemahannya adalah memerlukan lahan pengolahan yang luas.

Pengolahan limbah dengan cara konvensional tersebut berkembang dengan menggunakan digester anaerob, yaitu dengan mensubstitusi proses yang terjadi di kolam anaerobik pada sistem konvensional kedalam tangki digester. Tangki digester berfungsi menggantikan kolam anaerobik yang dibantu dengan pemakaian bakteri mesophilic dan thermophilic (Naibaho, 1996). Kedua bakteri

ini termasuk bakteri methanogen yang merubah substrat dan menghasilkan gas metana. Metode ini juga dapat menghasilkan biogas yaitu dengan substrat 15 L akan diperoleh biogas mencapai 121 liter (Mahajoeno dkk, 2008). Potensi biogas yang dihasilkan dari 600-700 kg limbah cair PKS dapat menghasilkan sekitar 20 m³ biogas (Goenadi, 2006) dan setiap m³ gas metana dapat diubah menjadi energi sebesar 4.700 – 6.000 kkal atau 20-24 MJ (Isroi, 2008).

Pengolahan limbah cair PKS dapat juga menggunakan teknologi pemisahan membran (Agustina, dkk, 2008). Kelebihan dari metode ini adalah tidak membutuhkan lahan yang luas dan konsumsi energinya relatif lebih rendah, namun kekurangannya adalah fluks dan selektifitas karena pada proses membran umumnya terjadi fenomena fluks berbanding terbalik dengan selektifitas, yaitu semakin tinggi fluks akan berakibat menurunnya selektifitas dan sebaliknya. Sedangkan hal yang diinginkan dalam proses berbasis membran adalah mempertinggi fluks dan selektifitas. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dicoba suatu teknologi dalam pengolahan limbah cair PKS, yaitu dengan menggunakan proses perokson.

2.3 Ozon Sebagai Oksidator

Ozon ditemukan pada tahun 1840 oleh Christian Friedrich Schönbein dan kemudian pada tahun 1893 diaplikasikan sebagai disinfektan air minum. Penelitian terhadap ozon terus dilakukan dan pertama kali digunakan secara komersial pada tahun 1907 pada pengolahan air kota di Nice. Nama ozon diambil dari kata *ozein* yang berarti bau dalam bahasa Yunani kuno.

Ozon (O₃) adalah molekul yang tersusun dari tiga buah atom oksigen. Molekul oksigen dapat dipecah dengan menggunakan energi tinggi untuk menghasilkan molekul O dan molekul O ini akan berikatan dengan molekul oksigen (O₂) lainnya sehingga akan membentuk ozon (O₃). Reaksi ini adalah reaksi *reversible* sehingga ozon dapat terdekomposisi kembali menjadi oksigen. Ozon merupakan oksidator yang kuat, hal ini tidak terlepas dari sifat ozon yang dikenal memiliki sifat radikal sehingga sifat oksidator yang dimiliki ozon ini kemudian dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi antara lain untuk menghilangkan warna, menghilangkan bau, dan menguraikan senyawa organik (Pikatan, 2008).

Gas ozon tidak dapat disimpan karena ozon secara spontan terurai kembali menjadi atom oksigen (Kogelschatz, 1988).

Ozon adalah molekul triatomik, terdiri dari tiga atom oksigen dan merupakan gas yang tidak stabil, yang diproduksi ketika molekul oksigen berdisosiasi menjadi atom oksigen. Pada suhu ruang, ozon merupakan gas berwarna biru dan memiliki bau yang tajam. Ozon dapat dideteksi oleh hidung manusia pada konsentrasi 0,01 – 0,05 ppm. Ozon merupakan salah satu oksidator yang kuat seperti ditampilkan pada Tabel 2.2. Ozon akan meledak saat konsentrasinya mencapai 240 g/m^3 atau 20% di udara (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabel 2.2 Oksidator dan Potensial Oksidasinya

Oksidator	Potensial Oksidasi (mV)
Fluorin	3,06
Ozon	2,07
Hidrogen Peroksida	1,80
Permanganat	1,67
Klorin Dioksida	1,50
Asam hipokloro	1,49
Gas klorin	1,36

Sumber: Manley dan Niegowski, 1967

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

Seperti halnya oksigen, kelarutan ozon dalam air juga dipengaruhi oleh suhu dan tekanan parsial ozon dalam fase gas.

Tabel 2.3 Kelarutan Ozon dan Oksigen dalam Air

Suhu (°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, R.G. dan M.E. Browning, 1981

Ozon terus mengalami perkembangan dan pada tahun 2009 dilakukan penelitian untuk pengolahan air bersih dan air minum dengan jenis pipa koaksial dan aliran *single pass* (Lukmanto, 2009). Masing-masing ozonator terdiri atas lima pipa koaksial yang dipasang secara konsentris. Ozonator jenis pipa koaksial ini dirancang mudah dan murah dalam hal pembuatan dan perawatannya serta memiliki produktivitas yang tinggi, yang mampu mendekati produk di pasaran. Ozonator hasil rancang bangun memiliki produktivitas ozon mencapai 0,4 gr/jam dengan umpan udara dan 1,8 gr/jam dengan umpan oksigen. Pada tahun yang sama, dilakukan penelitian terhadap unit pengolahan air dengan menggunakan ozon dimana variable yang ditinjau adalah logam besi dan mangan (Rozi, 2009).

Penelitian kemudian dikembangkan dengan penggunaan ozonator ukuran besar dan aliran *double pass* (Adami, 2010). Pada penelitian ini, dibuat dua ozonator dengan variasi jumlah pipa koaksial yaitu ozonator dengan satu pipa koaksial dan ozonator dengan lima pipa koaksial.

2.4 Peran Plasma dalam Proses Ameliorasi

Plasma juga merupakan salah satu hal penting dalam penelitian ini karena selain menghasilkan ozon, reaktor yang digunakan juga menghasilkan plasma. Di bawah ini akan dijelaskan plasma secara umum dan jenis-jenis plasma itu sendiri.

2.4.1 Plasma Secara Umum

Plasma pertama kali diketahui oleh seorang ilmuwan Inggris bernama Sir William Crookes pada tahun 1879. 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 (Langmir, 1929). Sehingga secara sederhana plasma merupakan gas terionisasi dan dikenal sebagai fase keempat setelah fase padat, cair, dan gas. Perbedaan keempat fasa ini dapat dilihat pada Tabel 2.4. di bawah ini.

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

Karakteristik	Padat	Cair	Gas	Plasma
Fasa	Memiliki bentuk dan volume tertentu	Fase dengan bentuk tidak jelas namun 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 pergerakan	Rendah	Lebih tinggi daripada padatan	Tinggi	Sangat tinggi
Perubahan bentuk	Dapat dilakukan secara paksa	Terjadi berdasarkan bentuk wadahnya	Terjadi berdasarkan wadah dan kontainernya	Bentuknya tidak jelas
Suhu (T)	$T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0 < T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 100.000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sumber: Lieberman dan Lichtenberg, 2005.

2.4.2 Jenis-jenis Plasma

Plasma ada di alam sekitar kita dalam berbagai bentuk, seperti petir, matahari, aurora, ionosfer, bintang, dan juga di lingkungan manusia, seperti pengelasan listrik, mesin lucutan listrik, cahaya pucat di *pantograph* kereta api, api, cahaya *fluorescent*, dan lampu neon.

Terdapat beberapa cara untuk mengklasifikasi plasma ini. Salah satunya adalah berdasarkan derajat ionisasi. Derajat ionisasi didefinisikan sebagai kepadatan jumlah ion dibagi dengan jumlah partikel netral. Semua partikel netral terionisasi dalam plasma ketika derajat ionisasi adalah satu. Di sisi lain, tidak ada partikel netral terionisasi ketika derajat ionisasi adalah nol.

Berikut pengklasifikasian plasma berdasarkan perbedaan derajat ionisasi:

- a) Plasma terionisasi sempurna: derajat ionisasinya adalah $> 90\%$. Partikel netral memiliki sedikit efek pada plasma.
- b) Plasma terionisasi lemah: derajat ionisasinya adalah $< 1\%$. Efek elektron dominan.
- c) Plasma terionisasi sebagian: memiliki karakter campuran dari plasma terionisasi sepenuhnya dan plasma terionisasi lemah.

Pada plasma yang dihasilkan secara artifisial (buatan), terdapat metode lain untuk mengklasifikasikan plasma, yaitu berdasarkan metode pembangkitan (generasi). Di antara berbagai metode pembangkitan plasma, klasifikasi berikut dapat digunakan:

- a) Plasma lucutan listrik.
- b) Plasma akibat gelombang-mikro.
- c) Plasma akibat gelombang-kejut.
- d) Plasma akibat *Magneto hydrodynamic* (MHD).
- e) Plasma akibat pancaran partikel energi tinggi (elektron dan ion).
- f) Plasma akibat pembakaran.
- g) Plasma akibat laser.

Plasma juga dapat diklasifikasikan sebagai berada dalam suatu keadaan kesetimbangan atau tidak. Kesetimbangan didefinisikan sebagai keadaan dimana suhu elektron, ion, dan partikel alami adalah sama dan kesetimbangan ionisasi terjadi. Dalam *non-equilibrium plasma*, temperatur elektron biasanya lebih tinggi daripada suhu partikel netral. Berikut pembagian plasma berdasarkan keadaan kesetimbangan:

- a) Plasma berkesetimbangan (*Equilibrium Plasma*): apabila T_g (suhu gas plasma) sama dengan T_g dan T_i (suhu ion). Sebagai contoh, plasma termal *arc discharge* tekanan atmosferik.
- b) Plasma tak setimbang (*Non-Equilibrium Plasma*): apabila T_g lebih besar dari T_g dan T_i . Sebagai contoh, plasma lucutan cahaya tekanan rendah dan plasma berdenyut tegangan tinggi tekanan atmosferik.

Dalam aplikasinya pada proses-proses industri, plasma dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu plasma termal (plasma panas) dan plasma non-termal (plasma dingin) dengan penjelasan sebagai berikut:

- a) Plasma termal (plasma suhu tinggi)

Memiliki ciri suhu tinggi, densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Plasma jenis ini memiliki sifat mobilitas yang jauh lebih tinggi yang menyebabkan energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, jika dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis menjadi sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat serta dapat mencapai suhu 20.000°C atau lebih untuk di daerah inti pijar plasma, serta untuk daerah marjinal akan turun secara cepat sehingga daerah marjinal ini sebagai daerah operasinya akan memiliki suhu sekitar 5000 K (H.Huang dan L.Tang, 2007).

Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau *radio frequency (RF) inductively coupled discharges* (Kogelschatz, 2003). Plasma matahari juga termasuk salah satu contoh plasma termal. Tabel 2.5 di bawah ini menampilkan klasifikasi plasma berdasarkan temperatur.

Tabel 2.5 Klasifikasi Plasma berdasarkan Temperatur

Jenis Plasma	Temperatur	Contoh
Plasma temperatur tinggi (<i>Equilibrium plasma</i>)	$T_e = T_i = T_h,$ $T_p = 10^6 K - 10^8 K;$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Plasma fusi laser
Plasma temperatur rendah/plasma termal (<i>Quasi-Equilibrium plasma</i>)	$T_e \approx T_i \approx T_h,$ $T_p = 2 \times 10^3 K - 3 \times 10^4 K;$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Plasma busur; <i>atmospheric RF discharge</i>
Plasma non-termal (<i>Non-equilibrium plasma</i>)	$T_e \geq T_h,$ $T_p \approx 3 \times 10^2 K - 4,5 \times 10^2 K;$ $n_e \approx 10^{10} m^{-3}$	<i>Corona discharge</i>

Keterangan: T_e = suhu elektron, T_i = suhu ion, T_h = suhu netral, T_p = suhu plasma, n_e = kerapatan elektron. Sumber: H.Huang dan L.Tang, 2007.

b) Plasma non-termal (plasma dingin)

Plasma non-termal memiliki densitas energi yang lebih rendah dibandingkan dengan plasma termal. Perbedaan suhu antara elektron dan partikel yang lebih berat jauh berbeda. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu elektron melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang.

Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain atau tidak praktis maupun tidak ekonomis jika dilakukan dengan metode lain. Aplikasi plasma ini antara lain pada modifikasi permukaan lokal karena ion, atom dan molekul tetap relatif dingin dan tidak menyebabkan kerusakan termal pada permukaan yang disentuh. Plasma jenis ini dihasilkan melalui berbagai jenis seperti pancaran pijar (*glow discharge*), *corona discharge*, dan *dielectric barrier discharge (DBD)* yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt per cm^{-3} (Bardos dan Barankova, 2009). Perbedaan antara ketiga jenis pancaran plasma non-

termal ini dapat dilihat pada Tabel 2.6 di bawah. Contoh plasma non-termal adalah *Aurora Borealis* dan *Aurora Australis*.

Tabel 2.6 Karakteristik Non-thermal Discharge

Parameter	<i>Glow discharge</i>	<i>Corona discharge</i>	DBD
Tekanan (bar)	$< 10^{-2}$	1	1
Medan listrik	0,01	0,5 - 50	0,1 - 100
Energi elektron (eV)	0,5 – 2	5	1 - 10
Temperatur elektron (K)	5.000 – 20.000	50.000	$10^4 - 10^5$
Densitas elektron (cm^{-3})	$10^8 - 10^{11}$	10^{13}	10^{14}
Derajat ionisasi	$10^{-8} - 10^{-5}$	kecil	10^{-4}

Sumber: Lieberman dan Lichtenberg, 2005.

Penggunaan plasma non-termal ini berkaitan dengan beberapa kelebihan yang dimiliki plasma non-termal jika dibandingkan dengan plasma termal, antara lain:

- Sehubungan dengan temperatur proses, plasma non-termal memiliki temperatur di bawah 450 K, sehingga memiliki tingkat bahaya yang lebih rendah jika dibandingkan dengan plasma termal yang memiliki temperatur di atas 1000 K.
- Reaktor dan segala perangkat yang digunakan untuk membangkitkan plasma non-termal lebih sederhana daripada perangkat yang digunakan untuk membangkitkan plasma termal, walaupun waktu terjadinya konversi berjalan lebih lambat.
- Kebutuhan listrik jika menggunakan plasma non-termal lebih sedikit daripada plasma termal, dimana plasma termal lebih membutuhkan uap air dan oksigen karena merupakan reaksi sub-nuklir.

2.5 Hidrogen Peroksida dan Perokson dalam Proses Oksidasi

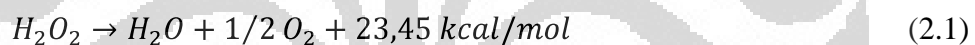
Hidrogen peroksida merupakan suatu hal yang penting dalam penelitian ini karena berkaitan dengan perannya sebagai salah satu oksidator. Hidrogen peroksida akan diinjeksikan ke dalam sistem dan dikombinasikan dengan oksidator yang lain yaitu berupa ozon.

2.5.1 Hidrogen Peroksida

Hidrogen peroksida (H_2O_2) adalah suatu cairan bening, agak lebih kental daripada air, dan merupakan oksidator kuat dengan potensial oksidasi sebesar 1,8 mV. Sifat Oksidator ini kemudian dimanfaatkan manusia sebagai bahan pemutih (*bleach*), disinfektan, oksidator, dan sebagai bahan bakar roket.

Senyawa ini pertama kali ditemukan oleh Louis Jacques Thenard pada tahun 1818. Bahan baku pembuatan hidrogen peroksida adalah gas hidrogen (H_2) dan gas oksigen (O_2). H_2O_2 tidak berwarna, berbau khas agak keasaman, dan larut dengan baik dalam air.

Mayoritas penggunaan hidrogen peroksida adalah dengan memanfaatkan dan merekayasa reaksi dekomposisinya, yang intinya menghasilkan oksigen. Pada tahap produksi hidrogen peroksida, bahan stabilizer kimia biasanya ditambahkan dengan tujuan untuk menghambat laju dekomposisinya. Selain menghasilkan oksigen, reaksi dekomposisi hidrogen peroksida juga menghasilkan air (H_2O) dan panas. Reaksi dekomposisi eksotermis yang terjadi adalah sebagai berikut:



Hidrogen peroksida dapat digunakan sebagai zat pengelantang atau *bleaching agent* pada industri pulp, kertas, dan tekstil. Senyawa ini juga biasa dipakai pada proses pengolahan limbah cair, industri kimia, pembuatan deterjen, makanan dan minuman, medis, serta industri elektronika (pembuatan PCB).

Salah satu keunggulan hidrogen peroksida dibandingkan dengan oksidator yang lain adalah sifatnya yang ramah lingkungan karena tidak meninggalkan residu yang berbahaya. Kebutuhan industri akan hidrogen peroksida terus meningkat dari tahun ke tahun. Walaupun saat ini di Indonesia sudah terdapat beberapa pabrik penghasil hidrogen peroksida seperti PT. Peroksida Indonesia Pratama, PT. Degussa Peroxide Indonesia, dan PT. Samator Inti Peroksida, tetapi kebutuhan di dalam negeri masih tetap harus diimpor.

Hidrogen peroksida dijual bebas dengan berbagai merek dagang dalam konsentrasi rendah (3-5%) sebagai pembersih luka atau sebagai pemutih gigi (pada konsentrasi terukur). Dalam konsentrasi agak tinggi, hidrogen peroksida

dijual sebagai pemutih pakaian dan disinfektan. Penggunaan hidrogen peroksida dalam kosmetika dan makanan tidak diperbolehkan karena zat ini mudah bereaksi (oksidan kuat) dan korosif.

2.5.2 Perokson

Hidrogen peroksida adalah suatu asam lemah sehingga apabila dikombinasikan dengan air akan terdisosiasi dalam bentuk ion hidro peroksida. Molekul hidrogen peroksida bereaksi sangat lambat dengan ozon, dimana hidro peroksida anion sangat reaktif. Kecepatan dekomposisi ozon dengan hidrogen peroksida meningkat seiring dengan kenaikan pH (Taube and Bray, 1940).

Beberapa metode telah digunakan untuk meningkatkan dekomposisi ozon dan menghasilkan hidroksil radikal yang lebih banyak, salah satunya adalah dengan menambahkan hidrogen peroksida ke larutan yang telah diozonasi. Apabila laju dekomposisi ozon dinaikkan, maka konsentrasi hidroksil radikal akan naik sehingga laju oksidasi juga akan naik. Metode penambahan hidrogen peroksida ini sering disebut dengan perokson.

Perokson adalah suatu *Advanced Oxidation Process* (AOP) yang bekerja dengan cara mengkombinasikan ozon dan hidrogen peroksida untuk membentuk hidroksil radikal yang dapat digunakan untuk mengoksidasi molekul organik di air. Penelitian menunjukkan perokson dapat dimanfaatkan untuk mendegradasi larutan klorin yang terdapat dalam air tanah (Glaze dkk, 1988). Pembentukan hidroksil radikal dari perokson mengikuti persamaan berikut (Langlais dkk, 1991).



Advanced Oxidation Process (AOP) sendiri adalah satu atau kombinasi dari beberapa proses seperti ozon, hidrogen peroksida, sinar ultraviolet, titanium

oksida, fotokatalisis, sonolisis, *electron beam*, *electrical discharges* (plasma) serta beberapa proses lainnya untuk menghasilkan hidroksil radikal. Radikal hidroksil adalah suatu spesies aktif yang memiliki sifat radikal, dimana mudah bereaksi dengan senyawa organik apa saja tanpa terkecuali, terutama senyawa-senyawa organik yang selama ini sulit atau tidak dapat diuraikan dengan metode mikrobiologi atau membran filtrasi.

Saat ini penelitian terkait pengembangan teknologi AOP meningkat sangat pesat. Hal ini terjadi dikarenakan AOP dengan hidroksil radikalnya tidak hanya memiliki kemampuan untuk menguraikan senyawa-senyawa organik, namun sekaligus dapat menghilangkan kandungan senyawa-senyawa turunan yang mungkin terbentuk selama proses oksidasi berlangsung. Hal ini dapat ditunjukkan dengan hanya karbon dioksida dan air saja sebagai hasil akhir dari proses oksidasi dengan AOP (Nayhyndi, 2010).

Penggunaan AOP ini mempunyai keunggulan-keunggulan sebagai berikut.

- Areal instalasi pengolahan air limbah yang tidak luas.
- Waktu pengolahan cepat.
- Penggunaan bahan kimia sedikit.
- Penguraian senyawa organik yang efektif.
- Keluaran (*output*) limbah lumpur (*sludge*) sedikit.
- Air hasil pengolahan (*wastewater*) dapat digunakan kembali.

Selain perokson, yang termasuk dalam AOP adalah metode-metode seperti di bawah ini:

- Ozonasi pada pH yang ditinggikan, yaitu apabila pH dinaikkan, maka laju dekomposisi ozon di dalam air juga akan naik
- Metode Fotokatalisis, dimana metode ini menggunakan katalis TiO_2 (titania) dalam fasa anatase dan dalam bentuk serbuk nanopartikel yang diaplikasikan sebagai fasa padatan (heterogen) baik terhadap fasa kontinyu cairan ataupun fasa gas.
- Teknologi Radiasi UV, dimana pada dasarnya teknologi ini memanfaatkan kekuatan ataupun keistimewaan dari radiasi sinar UV, mulai dari panjang gelombang 10 nm sampai 380 nm. Sampai saat ini,

jenis radiasi UV-A (dengan panjang gelombang 315 – 380 nm) masih paling banyak mendominasi teknologi aplikasi AOP, sedangkan radiasi sinar UV-C (panjang gelombang 10 – 280 nm) lebih banyak digunakan dalam bidang kesehatan dan dunia kedokteran

- Metode Ozon-UV (O_3/UV), dimana metode ini diaplikasikan secara sinergis dengan prekursor ozon (O_3) karena peranan radiasi sinar UV-C (khususnya pada panjang gelombang 184 nm) yang berperan dalam memicu pembentukan ozon, terutama pada fasa cair.
- Metode H_2O_2/UV , dimana metode ini merupakan perbaikan kinerja dari metode fotolisis langsung yang menggunakan radiasi sinar UV. Teknologi AOP ini cukup efektif untuk pengolahan dan penyisihan kontaminan-kontaminan jenis EDCs (*endocrine disrupting contaminants*) yang umumnya beracun dan mampu menghasilkan produk-produk samping yang bersifat estrogenik.
- Ozon + Katalis (Ozon/CAT), yaitu dengan menggunakan katalis heterogen ataupun katalis homogen. Beberapa logam oksida dan ion logam (Fe_2O_3 , Al_2O_3-Me , MnO_2 , Ru/CeO_2 , TiO_2-Me , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , dll) telah dipelajari dan terkadang memberikan percepatan yang signifikan dalam dekomposisi senyawa target, walaupun mekanisme reaksi dalam banyak kasus masih belum jelas.
- Metode Fenton (H_2O_2/Fe^{2+}), dimana reagen fenton adalah suatu campuran antara peroksida H_2O_2 dengan ion fero atau Fe(II) atau besi(II), yang dapat menghasilkan radikal hidroksil. Dengan adanya substrat, yaitu kontaminan yang akan disisihkan melalui proses oksidasi, radikal-radikal hidroksil yang terbentuk mampu mendetoksifikasi atau melemahkan daya racun dari kontaminan tersebut melalui reaksi oksidasi.

Perbandingan jumlah antara ozon dan hidrogen peroksida juga berpengaruh. Sebagai contoh, untuk mendegradasi 4-chlorophenol, rasio hidrogen peroksida/ozon yang paling optimum adalah 0,601 (Chamarro, 2001). Sedangkan untuk degradasi TCE dan PCE, rasio optimumnya adalah 0,5 (Sukhla, 2010). Pada

kasus degradasi *methyl tertiary butyl ether* (MTBE) dengan ozon sebanyak 4 mg/L dan hidrogen peroksida sebanyak 1,3 mg/L, akan menghasilkan konversi sebesar 78 % (Laing et al, 1999). Namun penelitian Laing ini juga menghasilkan kadar bromat yang melebihi batas sehingga dilakukan penelitian lebih lanjut dan dihasilkan perbandingan jumlah hidrogen hidroksida dengan ozon sebesar 1 (Laing et al, 2001).

Pemanfaatan perokson juga dapat digunakan untuk pengolahan limbah industri resin (Sugiarto, 2010). Industri resin mempunyai COD tinggi dan termasuk limbah yang sangat sulit untuk diuraikan. Hasil dari penelitian ini adalah menghasilkan konversi COD sebesar 95 %. Selain itu didapatkan juga bahwa penambahan hidrogen peroksida dapat mempercepat penurunan COD tinggi melalui proses oksidasi oleh radikal hidroksil yang terbentuk proses penguraian hidrogen peroksida oleh gas ozon dan sinar ultraviolet.

Perokson juga dapat dimanfaatkan untuk penyisihan COD dan warna pada limbah. Cairan uji yang digunakan adalah suatu larutan *azo dye* buatan yang bernama *Acid Red-151*. Berdasarkan penelitian ini, degradasi COD dan warna akan mencapai konversi yang paling tinggi saat pH sebesar 2,5 dan rasio hidrogen peroksida-ozon sebesar 0,5 (Acar dan Ozbelge, 2006)

Keuntungan dari penggunaan perokson antara lain adalah proses ini membutuhkan biaya yang lebih murah apabila dibandingkan dengan proses ozonasi karena dosis ozon yang diperlukan untuk mencapai level oksidasi kontaminan yang sama akan lebih rendah. Perokson juga lebih murah sekitar 200-300% dibandingkan dengan proses *granular activated carbon* untuk penghilangan trikloroetilena dan tetrakloroetilena (Aieta et al, 1988).

2.5.2.1 Perbandingan Antara Ozon dan Perokson

Perbedaan utama antara ozon dan perokson terletak pada mode oksidasi yang berlangsung, yaitu oksidasi langsung ataupun oksidasi radikal hidroksil. Reaktifitas yang berbeda juga akan menghasilkan efek yang berbeda pada reaksi ozon atau perokson tersebut dengan materi yang akan dioksidasi.

Laju dekomposisi ozon pada metode ozonasi adalah dengan kecepatan normal dan menghasilkan radikal hidroksil sebagai produk antara, sedangkan laju

dekomposisi ozon pada perokson lebih cepat sehingga konsentrasi radikal hidroksil pada perokson lebih tinggi apabila dibandingkan dengan metode yang hanya menggunakan ozonasi.

Waktu tinggal ozon untuk metode ozonasi adalah sekitar 5 – 10 menit, sedangkan pada perokson sangat sebentar karena reaksi yang sangat cepat. Kemudian dari segi materi yang ingin dioksidasi, ozon sangat bagus untuk mengoksidasi besi dan mangan, namun perokson kurang efektif. Untuk kasus oksidasi molekul berklorin perokson mempunyai kemampuan yang lebih baik apabila dibandingkan dengan ozon.

2.5.2.2 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Perokson

Di bawah ini akan disampaikan keuntungan dan kerugian penggunaan perokson, dimana dalam hal ini penggunaannya adalah untuk pengolahan air minum. Keuntungan penggunaan perokson adalah:

- Proses oksidasi lebih reaktif dan cepat apabila dibandingkan dengan proses molekular ozon.
- Efektif untuk mengoksidasi molekul organik yang sulit untuk dioalah.
- Sangat efektif dalam mengoksidasi molekul halogen.
- Kecenderungan untuk mengubah molekul karbon organik menjadi bentuk yang lebih *biodegradable* dapat ditingkatkan dengan penambahan hidrogen peroksida.

Sedangkan kerugian penggunaan perokson adalah:

- Hidrogen peroksida adalah oksidator kuat dan akan sangat berbahaya apabila dikontakkan dengan manusia.
- Hidrogen peroksida dapat disimpan di dalam ruangan, namun dapat terjadi kerusakan secara bertahap walaupun sudah disimpan secara benar.
- Kemampuan perokson untuk mengkosidasi besi dan mangan kurang efektif apabila dibandingkan dengan metode ozonasi.

2.6 Penentuan Kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD)

COD adalah jumlah oksigen (mg O_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang ada dalam 1 liter sampel air, dimana pengoksidasi $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ digunakan sebagai sumber oksigen (*oxidizing agent*) (G. Alerts dan SS Santika, 1987). Metode pemeriksaan yang digunakan adalah tanpa refluks yaitu dengan titrasi di laboratorium. Pemeriksaan parameter COD ini menggunakan oksidator potasium dikromat yang berkadar asam tinggi dan dipertahankan pada temperatur tertentu. Penambahan oksidator ini menjadikan proses oksidasi bahan organik menjadi air dan CO_2 , setelah pemanasan maka sisa dikromat diukur. Pengukuran ini dengan jalan titrasi, oksigen yang ekifalen dengan dikromat inilah yang menyatakan COD dalam satuan ppm (Rahmawati dan Azizah, 2004).

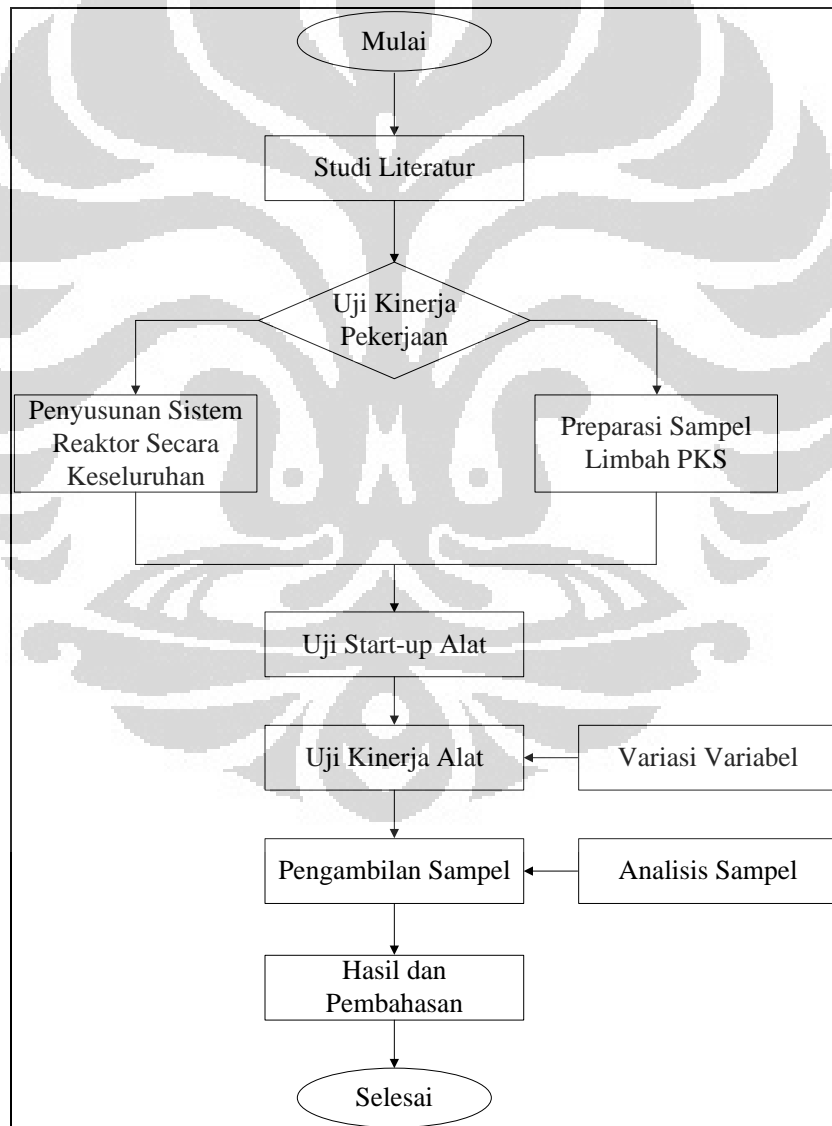
2.7 Penentuan Kadar Total Suspended Solid (TSS)

TSS adalah jumlah berat dalam mg/liter kering lumpur yang ada dalam limbah setelah mengalami penyaringan dengan membran berukuran 0,45 mikron (Sugiharto, 1987). Penentuan zat padat tersuspensi (TSS) berguna untuk mengetahui kekuatan pencemaran air limbah domestik, dan juga berguna untuk penentuan efisiensi unit pengolahan air (BAPPEDA, 1997). Metode yang digunakan untuk penentuan kadar TSS adalah dengan metode gravimetri. *Total Suspended Solid* adalah semua zat terlarut dalam air yang tertahan membran saring yang berukuran 0,45 mikron. Kemudian dikeringkan dalam oven pada temperatur 103°C – 105°C , hingga diperoleh berat tetap. Partikel yang sama besar, partikel yang mengapung dan zat-zat yang menggumpal yang tidak tercampur dalam air, terlebih dahulu dipisahkan sebelum pengujian (Rahmawati dan Azizah, 2004).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimulai dengan tahap pra-penelitian yaitu melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan proses ozonasi dan perokson dilanjutkan perancangan serta perangkaian reaktor pengolahan limbah yang akan digunakan. Lalu melakukan percobaan dengan pengujian variabel yang menjadi objek utama penelitian. Diagram alir dari penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi dua tahapan utama, yaitu:

3.1.1 Tahapan Pendahuluan

Merupakan tahapan dari dimulainya penelitian hingga terciptanya reaktor pengolahan limbah yang memakan waktu sekitar 3 bulan. Tahapan ini dapat dibagi lagi menjadi:

a. Studi literatur

Pada tahap awalan ini akan dilakukan studi-studi literatur yang terkait dengan proses ozonasi serta perokson serta limbah cair pada pabrik kelapa sawit.

b. Pembuatan reaktor pengolahan limbah

Reaktor pengolahan limbah dibuat berdasarkan detail rancangan yang telah dibuat. Pada tahapan akhir pembuatan reaktor dilakukan pengujian raktor serta preparasi sampel yang akan digunakan.

c. Pengujian reaktor

Reaktor yang telah dibuat diuji apakah telah siap digunakan pada kondisi operasi yang sesuai dengan kondisi operasi pada penelitian yang akan dilakukan. Pengujian ini juga dilakukan untuk memastikan tidak ada kebocoran maupun kerusakan pada reaktor.

d. Preparasi atau penyiapan sampel

Sampel yang akan digunakan dalam penelitian disiapkan terlebih dahulu yaitu dengan cara mengambil sampel limbah cair dari pabrik kelapa sawit yang terdapat di Pandeglang, Jawa Barat.

3.1.2 Penelitian dengan Proses Perokson

Tahapan ini dimulai setelah reaktor pengolahan limbah selesai dirancang dan diuji hingga analisis terhadap kinerja reaktor, berlangsung kurang lebih selama 3 bulan. Tahapan ini dapat dibagi lagi menjadi:

a. Tahap penelitian

Tahap ini adalah melakukan suatu penelitian dengan proses perokson dimana variabel yang divariasikan adalah tegangan pada ozonator dan rasio hidrogen peroksida-ozon.

b. Analisis penyisihan COD, TSS dan fenol

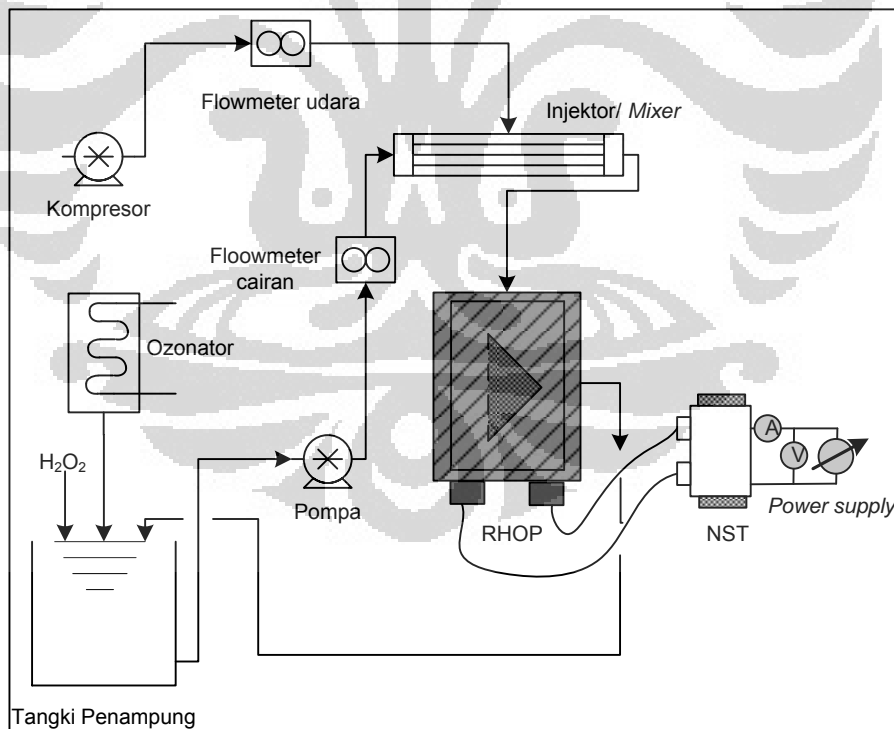
Setelah dilakukan proses perokson, kemudian dilakukan pengujian kandungan COD, TSS dan fenol pada limbah tersebut. kandungan ini kemudian dibandingkan dengan kandungan sebelum dilakukan proses perokson dan dilakukan analisis kinerja reaktor dalam penyisihan COD, TSS dan fenol.

c. Kesimpulan dan pembahasan

Pada tahap ini dilakukan pembahasan yang berkaitan dengan penelitian perokson ini serta dibuat kesimpulan dari penelitian yang sudah dilakukan.

3.2 Rancangan Penelitian

Di sini akan dijelaskan peralatan-peralatan yang akan digunakan pada penelitian. Sedangkan skema peralatan yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Skematis Alat Percobaan

3.2.1 Peralatan yang digunakan dalam Penelitian

Pada penelitian ini, digunakan beberapa peralatan yang mempunyai peran dan fungsi masing-masing. Di bawah ini akan dijelaskan detail peralatan yang digunakan pada penelitian ini.

3.2.1.1 Sumber Tegangan dan Pembangkit Tegangan Tinggi

Sumber tegangan yang digunakan adalah listrik tegangan bolak-balik (AC) yang berasal dari PLN. Listrik dari PLN ini kemudian diubah menjadi tegangan tinggi dengan menggunakan pembangkit tegangan tinggi untuk menghasilkan tegangan yang akan digunakan di dalam penelitian yaitu berkisar 100-200 volt. Disini juga dilengkapi alat untuk pengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan pembangkit plasma tersebut.

3.2.1.2 Reaktor Pengolahan Limbah

Reaktor pengolahan ini merupakan tempat untuk mengontakkan ozon dengan limbah yang akan diolah. Reaktor ini berfungsi sekaligus untuk menghasilkan ozon. Bagian-bagian yang terdapat pada reaktor pengolahan ini adalah sebagai berikut.

a. Media Dielektrik (selubung dielektrik)

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

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

b. Elektroda Massa

Elektroda yang digunakan berbentuk pipa berbahan Stainless Steel tipe SS-316 dengan diameter 3/8 dimana salah satu ujungnya disumbat dan diberi lubang sebagai keluaran aliran limbah, sedangkan ujung yang lainnya

dibuatkan terbuka yang akan dihubungkan dengan source limbah. Spesifikasi elektroda tegangan tinggi adalah sebagai berikut :

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

c. Elektroda Tegangan Tinggi

Elektroda ini terbuat dari kawat kasa dan berbahan Stainless Steel tipe SS-316 yang dililitkan pada dinding reaktor bagian luar yang berfungsi sebagai elektroda.

d. Pompa

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

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

Pompa dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pompa

e. Tempat Penampungan Limbah

Tempat ini merupakan tempat untuk menampung limbah dengan volume 5,5 L dan berbahan plastik. Di sini juga akan dilakukan penambahan hidrogen peroksida ke dalam limbah yang akan diolah.

f. Amperemeter

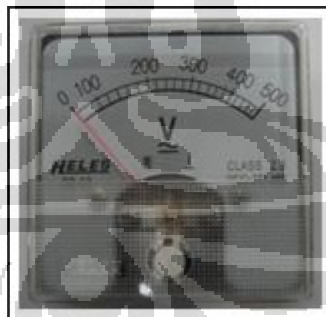
Amperemeter berfungsi untuk mengukur arus yang keluar dari regulator tegangan. Amperemeter yang digunakan adalah amperemeter jenis panel bermerek Heles dengan rentang 0-500 mA. Amperemeter dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.4 Amperemeter

g. Voltmeter

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



Gambar 3.5 Voltmeter

h. Flowmeter

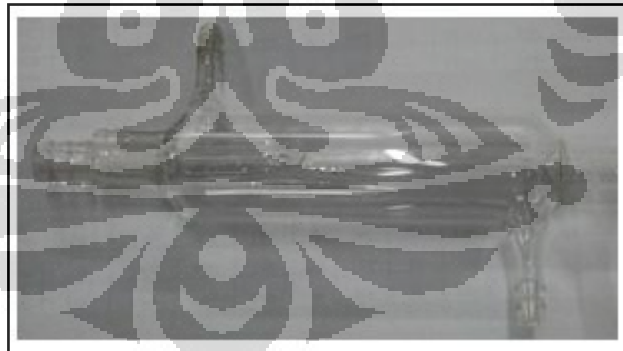
Flowmeter fluida berfungsi untuk mengukur laju alir reaktan yang digunakan. Flowmeter yang digunakan memiliki rentang laju alir 1-7 liter/menit. Flowmeter dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.6 Flowmeter cairan

i. 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 3.7 Injektor

3.2.1.3 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 3.8 Ozonator

3.2.2 Perangkaian dan Pengujian Reaktor Pengolahan Limbah

Reaktor pengolahan limbah serta peralatan-peralatan lainnya yang akan digunakan dalam penelitian ini dirangkai dan dibuat dengan berdasarkan skema alat percobaan pada Gambar 3.1.

Setelah semua peralatan tersusun dengan benar, maka selanjutnya adalah dilakukan proses pengujian reaktor yang berguna untuk memastikan tidak ada kerusakan alat yang dapat mempengaruhi kinerja peralatan yang digunakan serta mengetahui apakah reaktor tersebut siap untuk dioperasikan pada kondisi operasi yang sesuai dengan kondisi operasi yang akan digunakan di dalam penelitian.

3.2.3 Preparasi atau Penyiapan Sampel

Sampel yang akan digunakan adalah limbah cair dari pabrik kelapa sawit yang terdapat di daerah Malimping, Pandeglang, Jawa Barat. Metode pengambilan sampel limbah cair merujuk pada SNI 6989.59:2008 yang memuat hal-hal sebagai berikut.

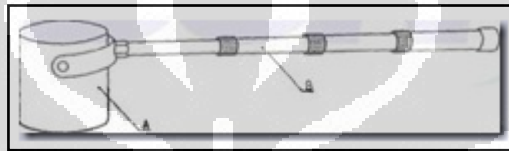
1. Persyaratan alat pengambil sampel

Alat pengambil sampel harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

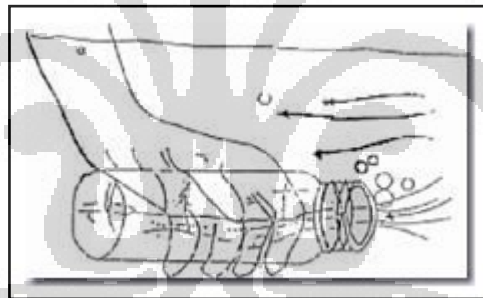
- Terbuat dari bahan yang tidak mempengaruhi sifat sampel.
- Mudah dicuci dari bekas sampel sebelumnya.

- Sampel mudah dipindahkan ke dalam botol penampung tanpa ada sisa bahan tersuspensi di dalamnya.
- Mudah dan aman di bawa
- Kapasitas alat tergantung dari tujuan pengujian.

Sedangkan peralatan yang dapat digunakan untuk mengambil sampel antara lain adalah gayung bertangkai panjang (Gambar 3.12) dan botol biasa (Gambar 3.13) ataupun alat pengambil sampel sederhana lainnya seperti ember plastik dilengkapi dengan tali.



Gambar 3.9 Alat pengambil sampel bertangkai panjang



Gambar 3.10 Alat pengambil sampel berupa botol

2. Persyaratan wadah sampel

Wadah yang digunakan untuk menyimpan sampel harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- Terbuat dari bahan gelas atau plastik poli etilen (PE) atau poli propilen (PP) atau teflon (*Poli Tetra Fluoro Etilen*, PTFE).
- Dapat ditutup dengan kuat dan rapat.
- Bersih dan bebas kontaminan.
- Tidak mudah pecah.
- Tidak berinteraksi dengan sampel.

3.3 Prosedur Percobaan

Di bawah ini akan dijelaskan prosedur-prosedur percobaan yang digunakan pada penelitian. Prosedur-prosedur ini meliputi variasi yang digunakan dalam penelitian, penentuan produktifitas ozon, penentuan rasio H_2O_2/O_3 , penentuan kandungan fenol, kurva kalibrasi fenol dan prosedur percobaan dengan proses perokson sendiri.

3.3.1 Variasi dalam Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Variabel bebas: tegangan input pada ozonator dan rasio hidrogen peroksida – ozon.
- Variabel kontrol: Suhu sistem (pada suhu ruang $\pm 25^\circ C$).
- Variabel terikat: kandungan fenol, *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Total Suspended Solid* (TSS).

3.3.2 Prosedur Penentuan Produktifitas Ozon

Tahap ini dilakukan untuk menentukan produktifitas ozon yang dihasilkan oleh reactor plasma-ozon. Data tentang produktifitas ozon ini sangat penting dalam percobaan karena berguna untuk menentukan rasio hidrogen peroksida-ozon. Setelah diketahui produktifitas ozon yang dihasilkan oleh reactor plasma-ozon, maka dapat dihitung berapa banyak hidrogen peroksida yang harus ditambahkan ke sampel agar sesuai dengan rasio yang diinginkan. Langkah-langkah untuk menentukan dosis ozon adalah sebagai berikut:

- Buat larutan KI 2% sebanyak 1 liter.
- Masukkan larutan KI yang telah dibuat ke bak penampungan limbah.
- Nyalakan kompressor udara dan mengalirkan udara ke reactor.
- Nyalakan pompa air agar cairan tersirkulasi.
- Atur tegangan sebesar 150 Volt.
- Lakukan ozonasi selama satu jam.
- Setelah dilakukan ozonasi, ambil sampel sebanyak 25 ml.
- Tambahkan H_2SO_4 2N sebanyak 4 ml.
- Tambahkan amilum 1% sebanyak 3-4 tetes sampai sampel berubah warna menjadi biru.

- Titrasi sampel menggunakan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,005M sampai sampel berubah warna menjadi bening.
- Hitung produktifitas ozon yang dihasilkan.
- Ulangi percobaan untuk tegangan 175, 200 dan 225 Volt.

3.3.3 Prosedur Penentuan Rasio $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$

Setelah didapatkan besarnya dosis ozon yang keluar dari ozonator, maka dapat ditentukan besarnya penambahan hidrogen peroksida ke dalam reaktor pengolahan limbah sesuai dengan rasio yang diinginkan. Langkah-langkah untuk menentukan rasio hydrogen peroksida – ozon adalah sebagai berikut:

- Hitung mol ozon yang dihasilkan dengan rumus:

$$\text{mol ozon} = \frac{\text{Produktifitas Ozon}}{\text{Berat Molekul Ozon}} \quad (1)$$

- Tentukan mol hidrogen peroksida dengan rumus:

$$\text{mol Hidrogen Peroksida} = x \times \text{mol ozon} \quad (2)$$

x = rasio yang kita inginkan (berkisar antara 0,4 – 1)

- Tentukan massa hidrogen peroksida yang diinjeksikan

$$\text{massa} = \text{mol } \text{H}_2\text{O}_2 \times \text{Berat Molekul } \text{H}_2\text{O}_2 \quad (3)$$

3.3.4 Prosedur Penentuan Kandungan Fenol

Limbah cair pabrik kelapa sawit juga mengandung fenol dan fenol ini juga akan dianalisis. Penentuan kandungan fenol ini merujuk pada SNI 06-6989.21-2004. Langkah-langkah percobaan untuk menentukan kandungan fenol adalah sebagai berikut:

- Ambil sampel sebanyak 10 ml.
- Encerkan sampel tersebut sampai 100 ml.
- Menambahkan NH_4OH 0,5 N sebanyak 2,5 ml.
- Atur pH larutan sampai nilai pHnya sebesar 7,9 – 8 dengan cara menambahkan buffer fosfat.
- Tambahkan larutan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ sebanyak 1 ml.

- Tambahkan larutan 4-aminoantipirin sebanyak 1 ml.
- Nyalakan alat spektrofotometer dan tunggu sampai alat siap selama 15 menit.
- Atur panjang gelombang sebesar 500 nm.
- Masukkan aquades ke dalam kuvet.
- Masukkan kuvet yang berisi aquades ke dalam spektrofotometer.
- Tekan tombol *setting blank* pada spektrofotometer.
- Masukkan sampel yang akan diuji ke dalam kuvet.
- Masukkan kuvet yang berisi sampel ke dalam spektrofotometer.
- Baca panjang gelombang di layar spektrofotometer.
- Hitung kandungan fenol dalam sampel.

3.3.5 Kurva Kalibrasi Fenol

Untuk mengetahui konsentrasi fenol didalam larutan, pertama kita membuat kurva kalibrasi. Adapun tahapan membuat kurva kalibrasi untuk larutan yang memiliki kadar *fenol* 0,200 mg/L - 5,000 mg/L adalah sebagai berikut :

- Optimalkan alat spektrofotometer sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengujian fenol kadar tinggi.
- Ukur 100 mL larutan baku secara duplo dan memasukkan ke dalam erlenmeyer 200 mL.
- Tambahkan 2,5 mL larutan NH_4OH 0,5 N dan mengatur pH menjadi $7,9 \pm 0,1$ dengan menambahkan larutan penyangga fosfat.
- Pindahkan larutan ke dalam erlenmeyer dan menambahkan 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, dibaca, dan dicatat 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).

3.3.6 Prosedur Percobaan dengan Perokson

Proses perokson yang dilakukan disini berlangsung secara *semi-batch* dimana sampel akan diganti untuk setiap variasi percobaan dan sampel yang digunakan terus disirkulasi selama proses ozonasi berlangsung yaitu seperti yang terlihat pada gambar 3.2. Prosedur percobaannya adalah sebagai berikut.

- Ambil data COD dan TSS pada sampel sebelum perlakuan.
- Masukkan sampel limbah ke bak penampungan limbah.
- Injeksikan hidrogen peroksida dengan rasio hidrogen peroksida - ozon sebesar 1 ke bak pengolahan limbah.
- Letakkan magnet stirrer ke dalam bak penampungan limbah dan kemudian menyalakan stirrer.
- Nyalakan kompresor udara agar udara mengalir ke reaktor.
- Nyalakan pompa cairan agar limbah tersirkulasi.
- Nyalakan sumber pembangkit tegangan tinggi dan mengatur tegangan sebesar 175 Volt.
- Lakukan ozonasi selama 120 menit.
- Ambil sampel untuk waktu 0 menit, 40 menit, 80 menit dan 120 menit.
- Ambil data COD, TSS dan fenol pada sampel setelah perlakuan.
- Ulangi percobaan dengan variasi rasio hidrogen peroksida-ozon sebesar 0,8, 0,6 dan 0,4.
- Ulangi percobaan untuk tegangan sebesar 200 Volt.

3.4 Analisis dan perhitungan Data Penelitian

Pada penelitian ini, analisis utama yang akan dilakukan adalah bagaimana pengaruh tegangan input ozonator dan rasio hidrogen peroksida – ozon terhadap penyisihan kandungan COD, TSS dan fenol pada limbah cair pabrik kelapa sawit.

3.4.1 Perhitungan Konversi

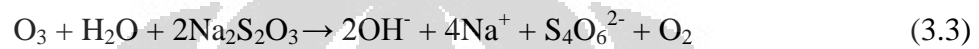
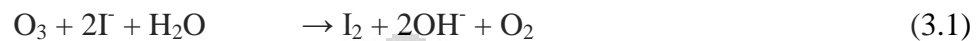
Dalam penelitian ini digunakan konversi yang pengertiannya hampir sama dengan persen penyisihan, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\text{Konversi} = \frac{\text{Kandungan Awal} - \text{Kandungan Akhir}}{\text{Kandungan Awal}} \times 100\% \quad (4)$$

Kandungan di sini adalah kandungan COD, TSS dan fenol pada sampel.

3.4.2 Perhitungan Produktifitas Ozon

Penentuan mol ozon yang didapatkan adalah berdasarkan mol $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ yang didapatkan dari titrasi. Persamaan reaksi titrasi ini adalah sebagai berikut.



Dari persamaan di atas, dapat dilihat bahwa jumlah mol ozon yang terbentuk oleh ozonator akan sama dengan setengah dari jumlah mol natrium tiosulfat yang terpakai. Kemudian Produktifitas ozon dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

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

$$\text{gram ozon} = \text{mol ozon} \times \text{berat molekul} \quad (6)$$

$$\text{kelarutan ozon} = \text{gram ozon} / \text{L} \quad (7)$$

$$\text{Produktifitas Ozon} = \text{kelarutan ozon} \times \text{laju alir udara masuk} \quad (8)$$

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai reaktor hibrida ozon-plasma yang dirancang, penjelasan mengenai fenomena proses O_3/H_2O_2 (perokson) yang terjadi, serta uji kinerja reaktor plasma-ozon untuk pengolahan limbah cair dari pabrik kelapa sawit.

4.1 Uji Kinerja Awal Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP)

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah merancang dan merakit reaktor plasma-ozon yang digunakan. Setelah reaktor selesai dirakit, maka langkah selanjutnya adalah melakukan uji kinerja reaktor plasma-ozon. Sebelum melakukan uji produktifitas ozon, perlu dilakukan uji fisik berupa uji kebocoran untuk memastikan agar alat dapat digunakan dengan aman tanpa terjadi kebocoran. Pada saat pertama kali dilakukan uji kebocoran, masih terdapat beberapa titik yang bocor sehingga harus dibenahi, misalnya dengan cara menambahkan *seal tape* ke sambungan yang bocor.

Setelah itu, dilakukan uji kinerja reaktor dengan cara mensirkulasi larutan tinta yang berwarna biru ke dalam reaktor. Namun, setelah dilakukan ozonasi selama dua jam larutan tetap berwarna biru sehingga dimungkinkan bahwa ozon yang dihasilkan sangat kecil. Kemudian dilakukan uji produktifitas ozon untuk mengetahui besar ozon yang dihasilkan oleh reaktor dengan metode yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

4.1.1 Analisis Keselamatan Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP)

Reaktor plasma-ozon mempunyai resiko yang sangat besar karena terdapat listrik yang dioperasikan pada tegangan tinggi. Aspek keselamatan merupakan suatu aspek yang sangat penting dalam suatu penelitian sehingga aspek ini harus diperhatikan dalam penelitian ini. Berikut aspek-aspek keselamatan yang harus diperhatikan selama berlangsungnya penelitian ini.

a. Uji Kebocoran

Uji kebocoran dilakukan dengan cara mensirkulasi air di dalam reaktor, kemudian dilihat apakah masih terdapat kebocoran pada reaktor yang digunakan.

Apabila masih terdapat kebocoran, maka perlu diperiksa kembali apakah komponen tersebut masih dapat digunakan atau tidak. Apabila komponen tersebut tidak dapat digunakan, maka harus diganti dengan komponen yang baru. Titik yang paling sering terjadi kebocoran adalah di sambungan-sambungan. Untuk mengatasi masalah ini, dapat dilakukan dengan cara menambahkan *seal tape* pada sambungan tersebut sehingga tidak terjadi kebocoran lagi.

Uji kebocoran ini sangat penting karena dilihat dari aspek keamanan, akan sangat berbahaya apabila terjadi kebocoran dan cairan tersebut terkontak dengan listrik tegangan tinggi. Selain itu, juga untuk mencegah agar cairan yang berada di dalam system tidak terkontaminasi oleh kotoran-kotoran yang berasal dari luar sehingga dapat mengganggu jalannya proses.

b. Penggunaan Karet Ban Pada Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP)

Pada saat pertama kali melakukan pemasangan reaktor pada panel, penahan reaktor tidak dapat berfungsi dengan baik dikarenakan lubang penahan reaktor ini lebih besar dari diameter reaktor itu sendiri. Hal ini menyebabkan reaktor tidak dapat terpasang di panel dan jatuh ke bawah. Masalah ini dapat diatasi dengan pemasangan karet ban pada reaktor sehingga reaktor dapat dipasang pada penahannya dan tidak jatuh.

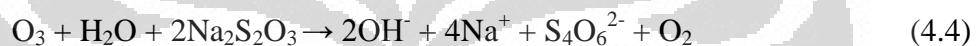
4.1.2 Uji Kinerja Ozonator Resun

Salah satu parameter yang penting pada proses perokson adalah rasio hidrogen peroksida terhadap ozon. Untuk itu, perlu diketahui nilai produktifitas ozon yang dihasilkan oleh ozonator. Pengujian produktifitas ozon ini menggunakan titrasi iodometri di mana prinsip utama pada metode ini adalah menentukan volume $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ untuk titrasi larutan sampel pada bagian hulu dan hilir.

Larutan pada awalnya akan berwarna bening dan kemudian berubah menjadi kuning, di mana hal ini menunjukkan adanya ozon yang mengoksidasi larutan KI tersebut. Perubahan warna dari bening menjadi kuning ini merupakan warna I_2 yang terbentuk melalui reaksi oksidasi I^- , adapun reaksinya sebagai berikut.



Persamaan di atas menunjukkan bahwa mol I_2 yang terbentuk sebanding dengan mol ozon yang diperlukan untuk mengoksidasi larutan KI, sehingga mol I_2 dapat dipergunakan untuk menghitung mol ozon yang diproduksi ozonator. Mol I_2 ini didapatkan dari volume $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ yang digunakan untuk menitrasi larutan. Sebelum titrasi, larutan perlu ditambah dengan larutan H_2SO_4 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 ini adalah sebagai berikut.



Prinsip titrasi adalah menambahkan larutan sampai larutan yang dititrasi berubah menjadi bening. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah I_2 sebanding secara stoikiometris dengan natrium tiosulfat. Dari persamaan 4.4 di atas, dapat dilihat bahwa 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.

Data yang didapatkan dari percobaan adalah sebagai berikut :

Laju alir ozonator = 9 L/menit

Tabel 4.1. Data Percobaan pada Analisis Produktivitas Ozonator

t (menit)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
	hulu (mL)	hilir (mL)
4,59	31,76	2,16
4,35	29,6	2,8

Data pada tabel di atas diolah dengan perhitungan yang terlampir pada lampiran. Hasil perhitungan yang didapatkan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2. Hasil perhitungan pada Analisis Produktivitas Ozonator

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

Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa produktivitas ozon rata-rata dari ozonator merk Resun RSO 9805 ini adalah sebesar 0,0495 g/jam dan nilai ini merupakan nilai produktivitas ozon resun yang akan digunakan untuk mengetahui jumlah hidrogen peroksida yang harus diinjeksikan ke dalam larutan.

4.1.3 Pengamatan Fenomena Plasma-Ozon

Setelah uji keselamatan dilakukan dan reaktor siap untuk digunakan, maka langkah selanjutnya adalah mengamati fenomena plasma yang terbentuk pada reaktor. Pengamatan ini dapat dilakukan dengan cara mengamati aspek visualisasi pembentukan plasma ketika reaktor dihidupkan dan memastikan bahwa reaktor yang telah dirancang dapat menghasilkan plasma.

Pengamatan dilakukan dalam dua tahapan utama, yang pertama adalah pengamatan profil plasma dalam reaktor tanpa beban cairan (hanya berisi gas/udara), dan kemudian profil plasma dalam reaktor yang dialiri oleh cairan (akuades dan limbah cair PKS).

a. Pengujian Pola Plasma dalam RHOP tanpa Beban Cairan

Pengamatan dimulai dengan cara menghubungkan sumber tegangan tinggi (plasmatron) ke sumber arus yang berupa listrik PLN. Kemudian reaktor dinyalakan dengan tanpa menyalakan pompa cairan sehingga hanya udara saja yang mengalir ke dalam reaktor. Tegangan masukan diatur menggunakan regulator tegangan dengan memutar bagian atasnya sehingga dapat diperhatikan pada tegangan berapa plasma sudah mulai muncul pada reaktor.

Pada tegangan primer plasmatron sebesar 70 Volt atau setara dengan 3,8 kV pada sekunder, plasma sudah mulai muncul ditandai dengan adanya bunyi dengungan pelan yang timbul akibat adanya lucutan listrik yang mengalir dari elektroda jala ke elektroda batang pada bagian dalam *tube* reaktor. Tegangan terus

dinaikkan sampai tegangan maksimal yang diperbolehkan tanpa beban cairan, yaitu pada tegangan primer plasmatron sebesar 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder karena diatas tegangan tersebut sudah mulai timbulnya *spark* yang menyebabkan suhu tabung reaktor naik. Kenaikan suhu ini dapat menyebabkan reaktor retak dan pecah.

b. Pengujian Pola Plasma dalam RHOP dengan Beban Cairan (Akuades) yang disirkulasi

Pada pengujian ini, bak penampungan diisi dengan aquades dan pompa cairan dinyalakan sehingga aquades dapat tersirkulasi di dalam reaktor. Pada tegangan primer plasmatron sebesar 100 Volt atau setara dengan 5,5 kV pada sekunder, timbul bunyi dengungan pelan yang menandakan timbulnya plasma pada reaktor. Tegangan terus dinaikkan dan plasma terbentuk semakin jelas. Tegangan primer plasmatron maksimal yang diperbolehkan untuk kondisi ini adalah sebesar 250 Volt atau setara dengan 13,6 kV pada sekunder karena pada tegangan ini dikhawatirkan terjadi kenaikan suhu dan kerusakan reaktor.

c. Pengujian pola plasma dalam RHOP dengan Beban Cairan (Limbah Cair PKS) yang disirkulasi

Pada pengujian ini, bak penampungan diisi dengan limbah cair PKS dan pompa cairan dinyalakan sehingga limbah cair PKS dapat tersirkulasi di dalam reaktor. Pada tegangan primer plasmatron sebesar 100 Volt atau setara dengan 5,5 kV pada sekunder, timbul bunyi dengungan pelan yang menandakan timbulnya plasma pada reaktor. Tegangan terus dinaikkan dan plasma terbentuk semakin jelas. Tegangan primer plasmatron maksimal yang diperbolehkan untuk kondisi ini adalah sebesar 250 Volt atau setara dengan 13,6 kV pada sekunder karena pada tegangan ini dikhawatirkan terjadi kenaikan suhu dan kerusakan reaktor.

d. Penentuan Produktifitas Ozon yang dihasilkan oleh RHOP

Pengujian RHOP juga dapat dilakukan dengan cara penciuman bau khas ozon. Jika oksigen dilewatkan pada medan plasma, maka oksigen tersebut akan terkonversi menjadi plasma. Oksigen yang digunakan dalam penelitian ini berasal

dari kompresor udara di mana seperti yang sudah kita ketahui kandungan oksigen di udara adalah sekita 21 %. Apabila suatu reaktor menghasilkan plasma, maka harusnya terdapat bau khas ozon di sekitar reaktor ataupun tangki penampungan limbah. Namun, pada pengujian beberapa tegangan, bau khas ozon ini tidak tercium. Kesimpulan yang dapat diambil dari sini adalah reaktor tidak menghasilkan ozon atau reaktor menghasilkan ozon namun dalam jumlah yang sangat kecil.

Untuk mengetahui berapa besar ozon yang dihasilkan oleh reaktor, maka dilakukan uji produktifitas ozon dengan metode iodometri. Pada metode ini, digunakan larutan KI 2% dan disirkulasi selama satu jam. Seharusnya, setelah diozonasi, larutan KI ini akan berubah menjadi kuning. Percobaan dimulai dari tegangan primer plasmatron sebesar 100 Volt atau setara dengan 5,5 kV pada sekunder dan perubahan warna tidak terlihat. Kemudian tegangan terus dinaikkan sampai sebesar 225 Volt (12,3 kV pada sekunder) yang merupakan tegangan tertinggi yang dapat digunakan pada penelitian ini. Namun, pada tegangan tersebut larutan KI juga tidak berubah menjadi kuning. Pengujian produktifitas ozon terus dilanjutkan dengan penambahan asam sulfat dan amilum. Setelah ditambahkan amilum, larutan sampel seharusnya berubah menjadi biru. Namun pada penelitian ini didapatkan bahwa setelah sekitar 15-20 menit larutan baru berubah menjadi biru keunguan.

Langkah selanjutnya pada pengujian produktifitas ozon ini adalah menitrasi larutan sampel dengan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,005 M. Dari volume larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ nantinya akan didapatkan mol ozon dan gram ozon yang dihasilkan. Dari penelitian ini volume $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ yang diperlukan untuk titrasi adalah sebagai berikut.

Tabel 4.3 Volume $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ untuk beberapa nilai tegangan

No.	Tegangan Sekunder (kV)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)
1.	8,2	0,1
2.	9,5	0,5
3.	11	0,4
4.	12,3	0,4

Data pada tabel di atas diolah dengan perhitungan yang terlampir pada lampiran. Hasil perhitungan produktifitas ozon untuk reaktor plasma-ozon yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.4 Produktifitas ozon untuk beberapa nilai tegangan

No.	Tegangan Sekunder (kV)	mol O ₃	Massa O ₃ (mg)	Produktivitas Ozonator (g/jam)
1.	8,2	$2,5 \times 10^{-7}$	0,012	0,0009
2.	9,5	$1,25 \times 10^{-6}$	0,06	0,004
3.	11	1×10^{-6}	0,05	0,0036
4	12,3	1×10^{-6}	0,05	0,0036

Terlihat bahwa nilai produktifitas ozon yang dihasilkan oleh reaktor ini sangat kecil. Pada tegangan primer plasmatron sebesar 150 Volt atau setara dengan 8,2 kV pada sekunder, produktifitasnya sangat kecil sehingga tidak dilakukan uji produktifitas ozon untuk tegangan di bawah 150 Volt. Untuk tegangan di atas 150 Volt, produktifitas ozon yang dihasilkan mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda, namun masih sangat kecil. Penelitian perokson ini salah satu variabelnya adalah rasio hidrogen peroksida terhadap ozon, sehingga sangat nilai produktifitas ozon ini sangat penting keberadaannya. Karena nilai produktifitas ozon dari reaktor yang telah dirancang sangat kecil, maka diputuskan untuk menggunakan ozonator tambahan yang mempunyai produktifitas ozon sebesar 0,05 gram/jam. Dengan tambahan ozonator ini, maka nantinya dapat ditentukan besar hidrogen peroksida yang harus diinjeksikan ke dalam sistem.

4.2 Proses Perokson untuk Ameliorasi Limbah Cair PKS

Proses perokson yang dilakukan di sini adalah dengan cara menginjeksikan hidrogen peroksida terlebih dahulu kemudian diikuti dengan menyalakan reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator resun. Hidrogen peroksida ditimbang sesuai dengan berat dan rasio yang diinginkan dan tegangan juga diatur sesuai dengan variable yang sudah ditentukan sebelumnya.

Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah tegangan pada transformator dan rasio hidrogen peroksida terhadap ozon. Proses dilakukan selama dua jam dan pengambilan sampel dilakukan tiap 40 menit dimulai dari

titik nol (sebelum perlakuan). Penelitian ini bertujuan untuk melihat bagaimana pengaruh variasi tegangan dan rasio hidrogen peroksida-ozon terhadap perbaikan kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit dengan parameter uji *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS) dan kandungan fenol pada limbah tersebut.

4.2.1 Pengaruh Tegangan Pada Transformator Terhadap Proses Perokson

Tegangan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 175 Volt pada tegangan primer plasmatron atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt pada tegangan primer plasmatron atau setara dengan 11 kV. Alasan pemilihan tegangan ini adalah karena tegangan yang lebih kecil dari 175 Volt mempunyai produktifitas ozon yang sangat kecil. Sedangkan tegangan yang lebih tinggi dari 200 Volt, yaitu 225 Volt (12,3 kV pada sekunder), dikhawatirkan reaktor akan pecah karena terjadi perubahan suhu pada saat dilakukan pengujian pada tegangan ini.

Produktifitas ozon pada tegangan 175 dan 200 Volt ini sendiri mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda, yaitu sebesar 0,004 dan 0,0036 gram/jam. Pada penelitian ini akan dilihat bagaimana pengaruh tegangan terhadap perbaikan kualitas limbah cair dari pabrik kelapa sawit dengan parameter uji *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS) dan kandungan fenol pada limbah tersebut.

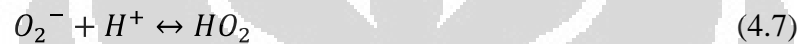
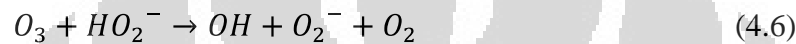
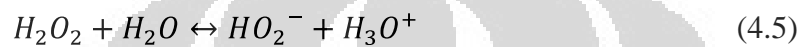
4.2.1.1 Pengaruh Tegangan pada Transformator terhadap Perbaikan Kandungan Chemical Oxygen Demand (COD)

COD adalah jumlah oksigen (mg O_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang ada dalam 1 liter sampel air, dimana pengoksidasi $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ digunakan sebagai sumber oksigen (*oxidizing agent*) (G. Alerts dan SS Santika, 1987)

Ozon (O_3) banyak dimanfaatkan untuk pengolahan limbah cair pada berbagai industri. Hal ini terjadi karena ozon dipercaya dapat memecah dan mengoksidasi molekul organik yang terdapat pada limbah cair sehingga kualitas limbah cair yang salah satunya ditunjukkan dengan parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) menjadi lebih baik.

Seperti reaksi pada hidrogen peroksida dengan sinar ultraviolet, reaksi ozon dengan hidrogen peroksida juga ditunjukkan untuk pembentukan radikal aktif hidroksil (Nugroho dan Ikkal, 2005). Pembentukan hidroksil radikal di sini tidak memerlukan fotolisis sehingga proses perokson sering disebut dengan AOP gelap (Zappi dkk, 1998). Hidroksil radikal inilah yang berperan untuk memecah rantai panjang molekul organik menjadi rantai yang lebih pendek yang bersifat lebih *degradable*.

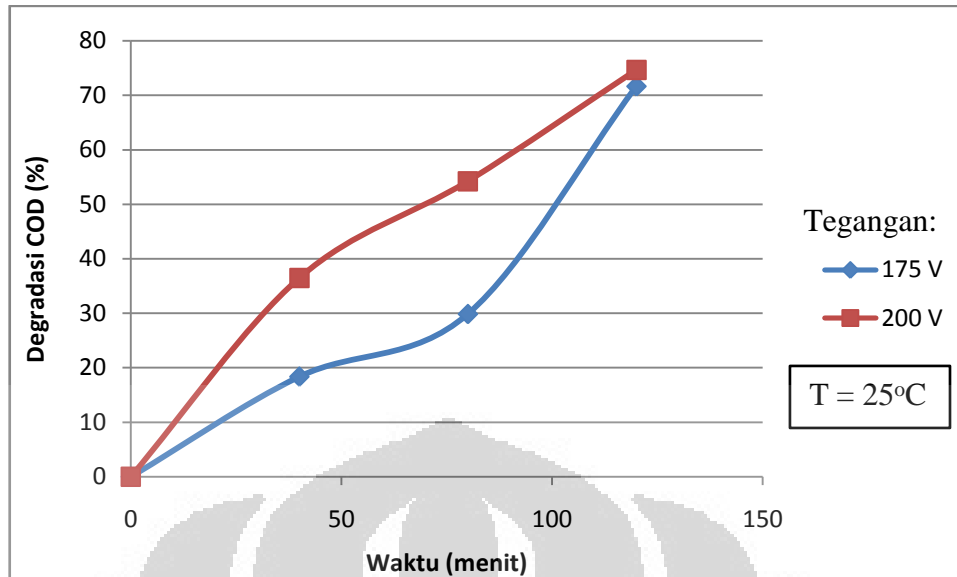
Mekanisme reaksi pembentukan hidroksil radikal pada proses perokson adalah sebagai berikut (Langlais et al, 1991).



Reaksi ini menghasilkan sebuah oksidator kuat tambahan berupa radikal hidroksil sehingga proses oksidasi molekul organik dapat ditingkatkan (Kaulbach, 1993).

a. Kinerja Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1 untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi COD untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

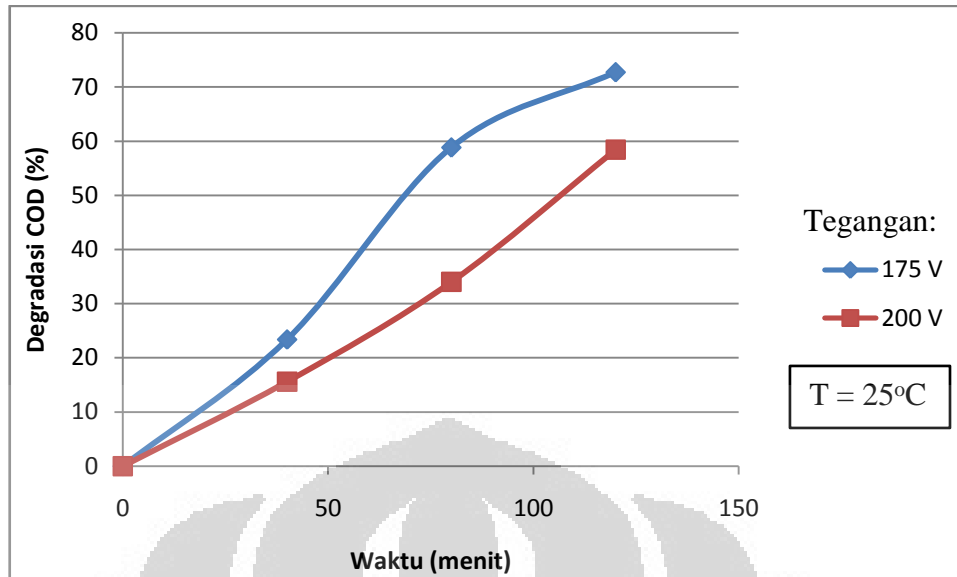


Gambar 4.1 Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa dengan bertambahnya waktu operasi, maka nilai degradasi juga semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa COD yang telah terdegradasi juga semakin banyak seiring dengan penambahan waktu. Pada rasio ini, terlihat bahwa degradasi COD pada tegangan primer plasmatron sebesar 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder mempunyai nilai yang lebih tinggi, namun pada titik akhir (120 menit) nilai degradasi ini tidak mempunyai perbedaan yang signifikan.

b. Kinerja Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8 untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi COD untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



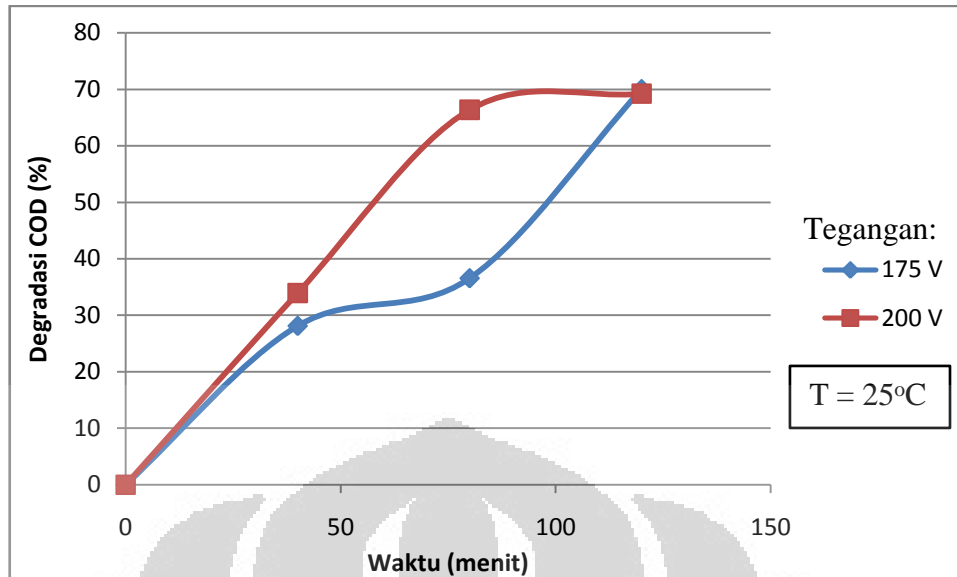
Gambar 4.2 Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa dengan bertambahnya waktu operasi, maka nilai degradasi juga semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa COD yang telah terdegradasi juga semakin banyak seiring dengan penambahan waktu.

Pada rasio ini, terlihat bahwa degradasi COD pada tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder mempunyai nilai yang lebih tinggi. Berbeda dengan rasio hidrogen peroksida-ozon sebesar 1, pada rasio 0,8 ini nilai pada titik akhir mempunyai perbedaan yang cukup signifikan.

c. Kinerja Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8 untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi COD untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

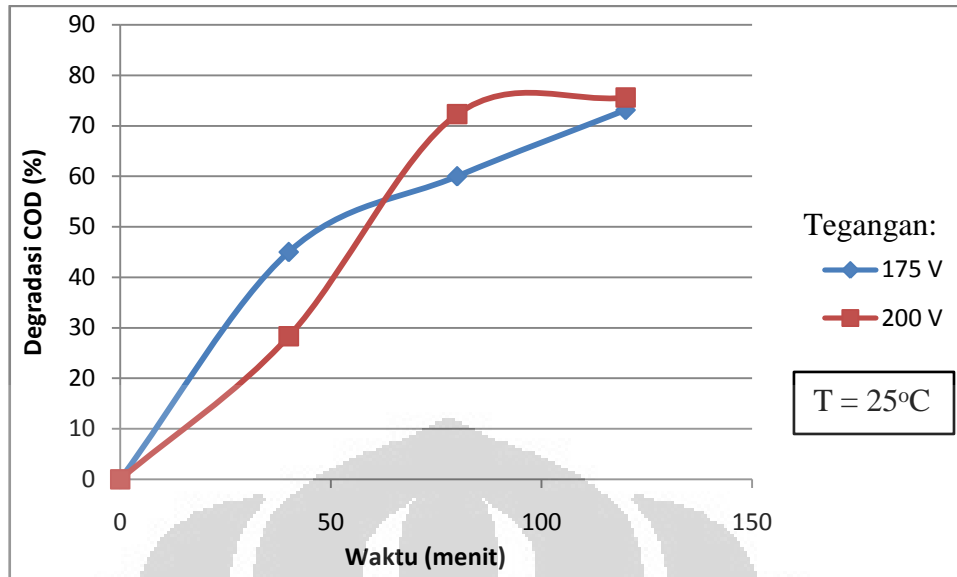


Gambar 4.3 Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa dengan bertambahnya waktu operasi, maka nilai degradasi juga semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa COD yang telah terdegradasi juga semakin banyak seiring dengan penambahan waktu. Pada rasio ini, terlihat bahwa degradasi COD pada tegangan 200 Volt mempunyai nilai yang lebih tinggi, namun pada titik akhir (120 menit) nilai degradasi ini tidak mempunyai perbedaan yang signifikan.

d. Kinerja Degradasi COD pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi COD untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



Gambar 4.4 Degradasi COD pada Rasio 0,4

Pada rasio ini, terlihat bahwa nilai degradasi COD pada 40 menit, tegangan 175 Volt mempunyai nilai yang lebih tinggi. Sedangkan pada 80 menit, tegangan 200 Volt mempunyai nilai yang lebih tinggi. Pada titik akhir (120 menit) sendiri nilai degradasi COD tidak mempunyai perbedaan yang signifikan.

Dapat disimpulkan di sini bahwa degradasi COD dengan proses perokson untuk tegangan 175 Volt dan 200 Volt mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda untuk semua rasio hidrogen peroksida-ozon yang digunakan. Degradasi warna dan kandungan COD pada suatu limbah cair akan naik seiring dengan kenaikan dosis ozon (Yasar et al, 2006). Produktifitas ozon yang dihasilkan reaktor hibrida ozon-plasma pada tegangan 175 Volt dan 200 Volt tidak jauh berbeda sehingga hal ini juga akan berpengaruh dengan degradasi COD, yaitu mempunyai nilai degradasi yang tidak jauh berbeda. Dengan kata lain, variabel tegangan pada plasmatron tidak berpengaruh terhadap proses perokson menggunakan RHOP pada tegangan 175 dan 200 Volt.

4.2.1.2 Pengaruh Tegangan pada transformator Terhadap Perbaikan Kandungan Total Suspended Solid (TSS)

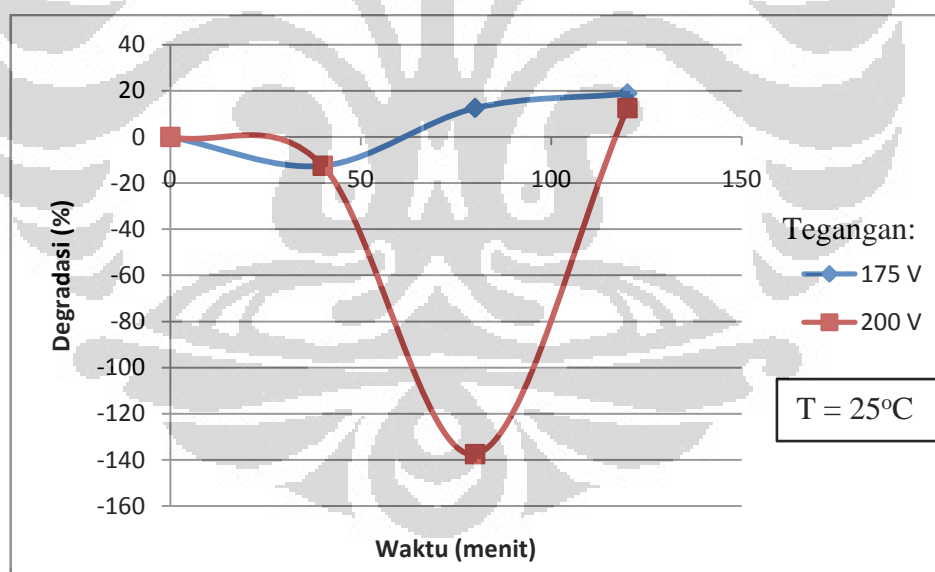
TSS adalah jumlah berat dalam mg/liter kering lumpur yang ada dalam limbah setelah mengalami penyaringan dengan membran berukuran 0,45 mikron (Sugiharto, 1987). Analisa zat padat merupakan petunjuk pencemaran air,

penentuan derajat kekotoran air limbah serta sebagai efek estetika dan kejernihan air. Karena adanya zat padat akan meningkatkan kepekatan limbah (Tchobanoglous, 2003).

Proses perokson seperti sudah dijelaskan sebelumnya menghasilkan hidroksil radikal yang dapat mendegradasi molekul-molekul organik yang terdapat pada limbah cair pabrik kelapa sawit. Dengan degradasi molekul organik ini, diharapkan kandungan TSS pada limbah tersebut juga dapat mengalami penurunan.

a. Kinerja Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi TSS untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



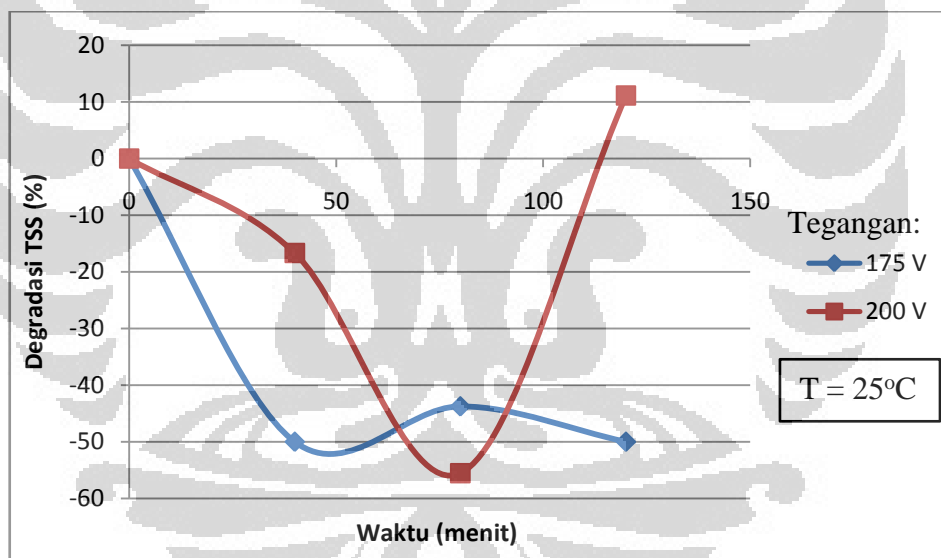
Gambar 4.5 Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa grafik tersebut mempunyai tren yang tidak beraturan dan sangat sulit untuk ditarik suatu kesimpulan mengenai pengaruh tegangan terhadap proses degradasi TSS.

Pada rasio ini, dapat dilihat bahwa proses perokson tidak berpengaruh terhadap degradasi TSS. Pada titik akhir, didapatkan persen degradasi sebesar 18,75% dan 12,5% untuk tegangan 175 dan 200 Volt, namun nilai ini sangat kecil dan sempat mengalami kenaikan kandungan TSS pada menit-menit sebelumnya. Nilai TSS awal dan akhir pada rasio ini tidak berbeda jauh.

b. Kinerja Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi TSS untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

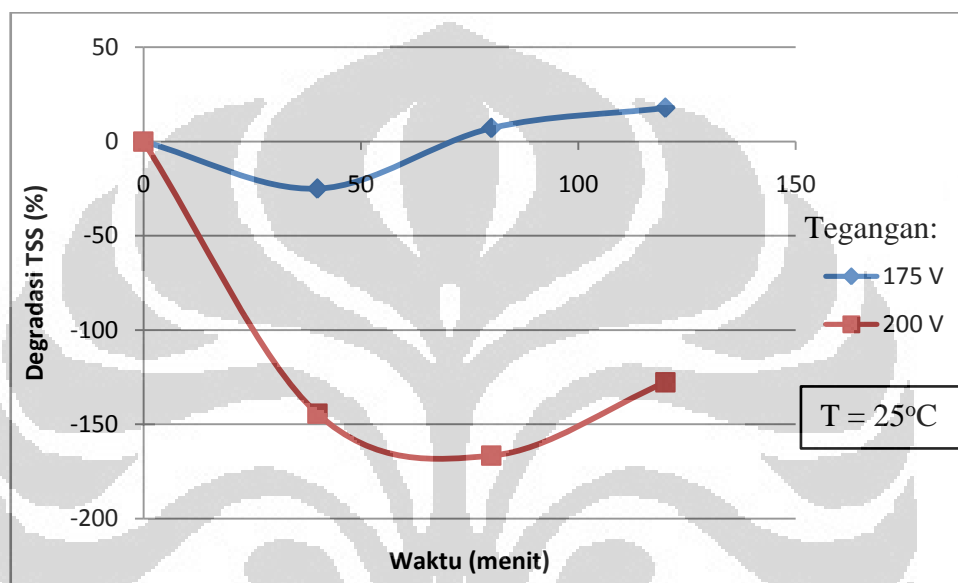


Gambar 4.6 Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Pada rasio ini, dapat dilihat bahwa proses perokson tidak berpengaruh terhadap degradasi TSS. Nilai TSS terus mengalami kenaikan pada tegangan 175 Volt sehingga degradasi TSS pada tegangan dan rasio ini selalu bernilai negatif. Untuk tegangan 200 Volt, nilai TSS juga terus mengalami kenaikan, namun di titik akhir mengalami penurunan dan mempunyai persen degradasi sebesar 11,11%.

c. Kinerja Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi TSS untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



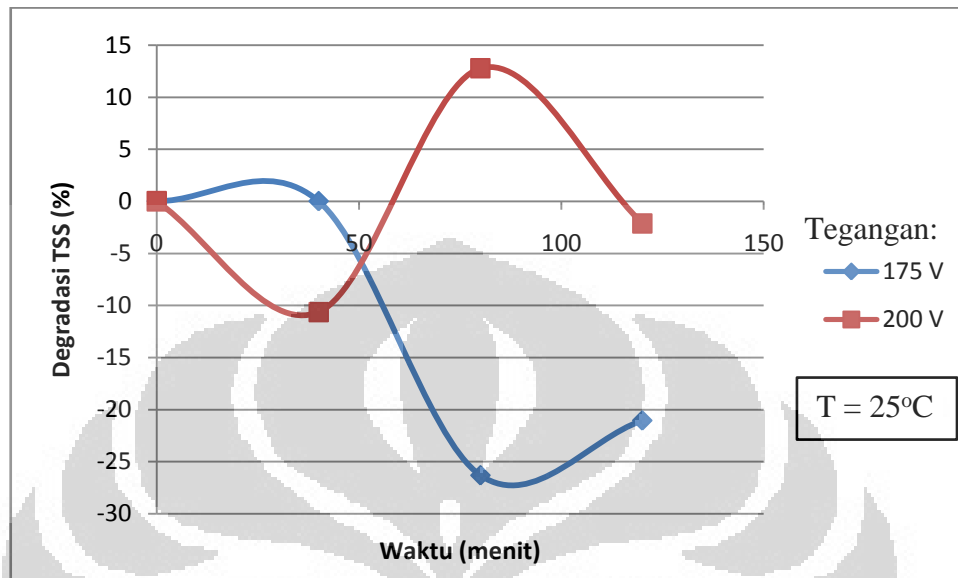
Gambar 4.7 Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Pada rasio ini, dapat dilihat bahwa proses perokson tidak berpengaruh terhadap degradasi TSS. Pada tegangan 175 Volt nilai TSS mengalami kenaikan pada waktu 40 menit dan setelah itu mengalami penurunan dan pada titik akhir mempunyai degradasi sebesar 17,86%. Sedangkan pada tegangan 200 Volt nilai TSS mengalami kenaikan apabila dibandingkan dengan nilai awal sehingga persen degradasi pada tegangan dan rasio ini mempunyai nilai negatif.

d. Kinerja Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder.

Tabel-tabel degradasi TSS untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



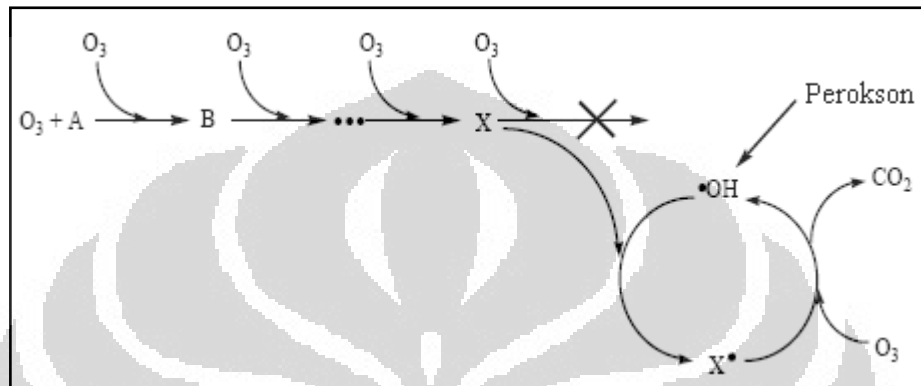
Gambar 4.8 Degradasi TSS pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Pada rasio ini, dapat dilihat bahwa proses perokson tidak berpengaruh terhadap degradasi TSS. Dari grafik ini terlihat bahwa pada kedua tegangan nilai degradasi TSS cenderung bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa nilai TSS terus mengalami kenaikan apabila dibandingkan dengan nilai TSS di titik awal.

Dapat disimpulkan di sini bahwa tegangan transformator tidak mempunyai efek yang signifikan terhadap proses degradasi TSS pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit. Secara umum, proses perokson juga tidak mampu memperbaiki kandungan TSS pada limbah cair di mana nilai TSS setelah perlakuan mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda dengan nilai TSS pada titik awal. Dari sini dapat diambil suatu kesimpulan bahwa proses perokson tidak cocok digunakan untuk memperbaiki kualitas TSS pada limbah cair pabrik kelapa sawit. Hal ini terjadi karena TSS yang mengalami penurunan adalah dalam bentuk zat organik sehingga membentuk pola grafik yang tidak beraturan, karena kandungan TSS tidak hanya terdiri zat organik saja akan tetapi terdapat partikel-partikel serta senyawa lain yang tidak teroksidasi oleh ozon (Supriyatin et al, 2010).

4.2.1.3 Pengaruh Tegangan pada transformator Terhadap Perbaikan Kandungan Fenol

Proses perokson seperti yang telah kita ketahui dapat menghasilkan radikal hidroksil yang dapat memecah molekul organik pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit. Mekanisme reaksi penyisihan fenol oleh radikal hidroksil dengan proses perokson adalah sebagai berikut (Tjahjadi, 2010):

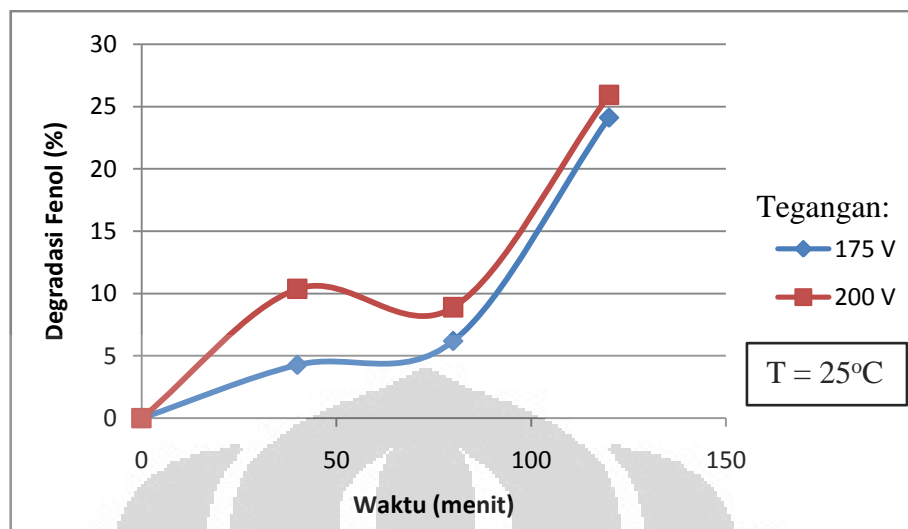


Gambar 4.9 Mekanisme reaksi penyisihan fenol oleh radikal hidroksil (Tjahjadi, 2010)

Penyisihan fenol pada proses ini terjadi melalui reaksi langsung antara fenol dengan ozon dan reaksi antara fenol dengan radikal hidroksil. Proses oksidasi dari fenol (A) dan produk samping fenol akan terjadi secara cepat di dalam larutan melalui reaksi langsung oleh ozon. Serangan langsung dari molekul ozon menghasilkan senyawa jenuh (X) yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon, tapi dapat dioksidasi melalui serangan radikal hidroksil dan membentuk radikal bebas hasil oksidasi (X^{\bullet}). Radikal bebas hasil oksidasi inilah yang kemudian bisa teroksidasi lagi dengan ozon. Reaksi antara radikal bebas hasil oksidasi (X^{\bullet}) dengan ozon akan membentuk radikal hidroksil.

a. Kinerja Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi fenol untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

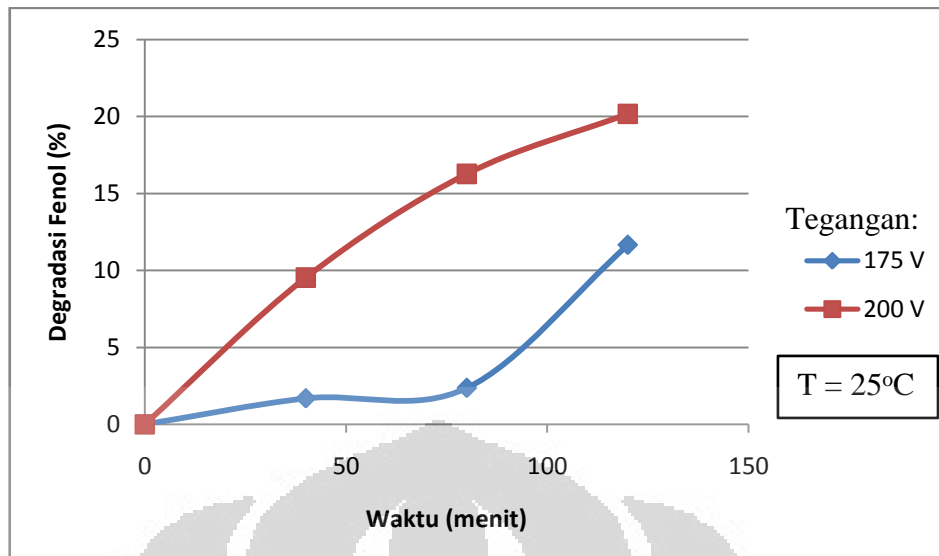


Gambar 4.10 Grafik Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Dari grafik ini dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan pada kedua tegangan, namun penurunan tersebut kurang signifikan. Konsentrasi fenol seiring dengan penambahan waktu terus mengalami penurunan pada tegangan 175 V, namun pada tegangan 200 V konsentrasi fenol pada menit 40 dan 80 mempunyai nilai yang hampir sama, yaitu sekitar 3 ppm. Di antara tegangan 175 dan 200 Volt di tiap titik juga mempunyai persen degradasi yang hampir sama, begitupun di titik akhir pada kedua tegangan yaitu mempunyai nilai sebesar 24,12% dan 25,92%.

b. Kinerja Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8 untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi fenol untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



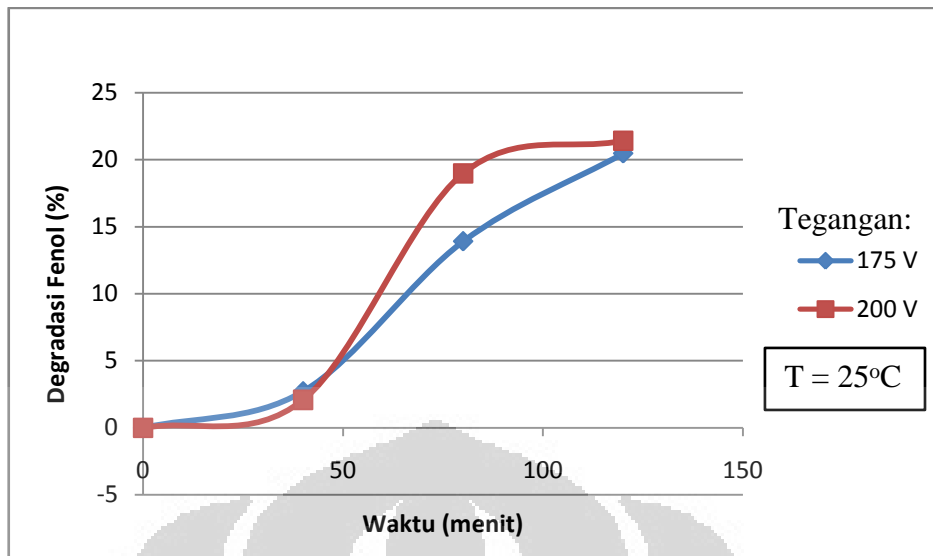
Gambar 4.11 Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa konsentrasi fenol terus mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu operasi. Untuk tegangan 200 V, kenaikan persen degradasi cukup signifikan di antara tiap titik waktu, sedangkan pada tegangan 175 V pada menit 40 dan 80 konsentrasi fenol yang terukur mempunyai nilai yang hampir sama.

Pada rasio ini terlihat bahwa penurunan konsentrasi fenol pada tegangan 200 Volt lebih tinggi daripada penurunan konsentrasi fenol pada tegangan 175 Volt. Namun penurunan ini mempunyai nilai yang kurang signifikan, yaitu hanya sebesar 20,17% pada tegangan 200 Volt.

c. Kinerja Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi fenol untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

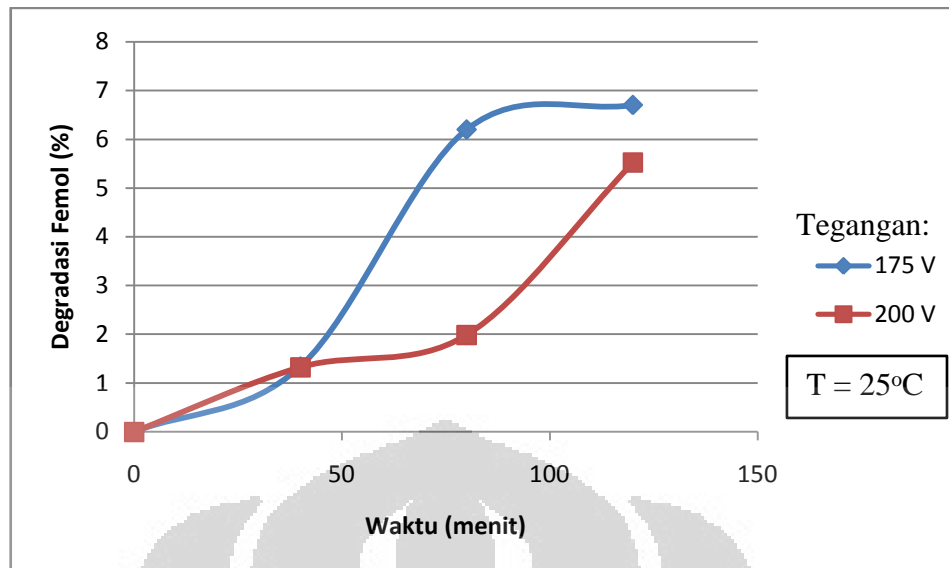


Gambar 4.12 Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Dari grafik ini dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol terus mengalami penurunan di tiap titik waktu pada kedua tegangan, namun penurunan tersebut mempunyai nilai yang kurang signifikan. Di antara tegangan 175 dan 200 Volt di tiap titik waktu juga mempunyai persen degradasi yang tidak jauh berbeda, begitupun di titik akhir pada kedua tegangan juga mempunyai nilai yang hampir sama yaitu sebesar 20,48% dan 21,43%.

d. Kinerja Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4 untuk untuk tegangan primer plasmatron sebesar 175 Volt atau setara dengan 9,5 kV pada sekunder dan 200 Volt atau setara dengan 11 kV pada sekunder. Tabel-tabel degradasi fenol untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



Gambar 4.13 Degradasi Fenol pada Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol terus mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu operasi pada kedua tegangan. Namun, penurunan yang terjadi sangat kecil, yaitu hanya sekitar 7% pada tegangan 175 V.

Pada rasio ini juga dapat dilihat bahwa persen degradasi pada kedua tegangan mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda. Namun persen degradasi pada rasio ini mempunyai nilai yang paling kecil di antara rasio yang lainnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa degradasi fenol dengan menggunakan proses perokson mempunyai hasil yang paling buruk pada rasio hidrogen peroksida – ozon sebesar 0,4.

Pengaruh tegangan pada degradasi fenol, dalam hal ini pada tegangan 175 dan 200 Volt, tidak mempunyai pengaruh yang cukup signifikan. Persen degradasi pada tegangan 200 Volt mempunyai nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan persen degradasi pada 175 Volt, namun tidak mempunyai perbedaan yang besar. Hal ini terjadi karena produktifitas ozon pada kedua tegangan mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda sehingga efektifitas dalam degradasi fenol juga tidak jauh berbeda.

4.2.2 Pengaruh Rasio H_2O_2/O_3 Terhadap Proses Perokson

Salah satu variabel yang berpengaruh dalam proses perokson adalah rasio hidrogen peroksida-ozon. Sebagai contoh, degradasi TCE dan PCE rasio optimumnya adalah 0,5 (Sukhla, 2010).

Sudah terdapat beberapa penelitian yang bertujuan untuk mempelajari berapa rasio yang diperlukan untuk suatu proses perokson. Rasio ini mempunyai nilai yang berbeda-beda untuk tiap limbah ataupun molekul organik tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk mencari berapa rasio yang tepat untuk proses perokson pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit dengan parameter uji berupa Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS) dan kandungan fenol.

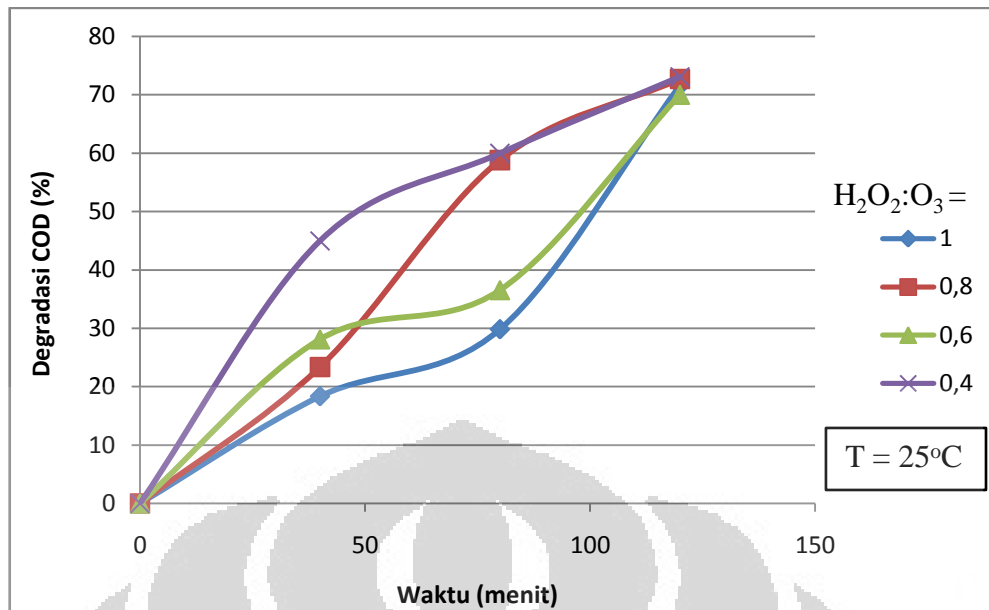
4.2.2.1 Pengaruh Rasio H_2O_2/O_3 terhadap Perbaikan Chemical Oxygen Demand (COD)

COD merupakan suatu parameter yang penting pada suatu limbah dan mempunyai batas tertentu agar dapat dibuang ke lingkungan karena apabila melebihi ambang batas dapat berbahaya bagi lingkungan.

Salah satu pemanfaatan perokson untuk degradasi COD adalah untuk pengolahan limbah industri resin (Sugiarto, 2010). Industri resin mempunyai COD tinggi dan termasuk limbah yang sangat sulit untuk diuraikan. Hasil dari penelitian ini adalah menghasilkan konversi COD sebesar 95 %. Perokson juga dapat dimanfaatkan untuk penyisihan COD dan warna pada cairan uji berupa suatu larutan azo dye buatan yang bernama Acid Red-151. Berdasarkan penelitian ini, degradasi COD dan warna akan mencapai konversi yang paling tinggi saat pH sebesar 2,5 dan rasio hidrogen peroksida-ozon sebesar 0,5 (Acar dan Ozbelge, 2006).

a. Kinerja Degradasi COD pada Tegangan Plasmatron 9,5 kV

Tegangan plasmatron sebesar 9,5 kV ini adalah berupa tegangan sekunder plasmatron atau setara dengan 175 Volt pada tegangan primer plasmatron. Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan saat tegangan sebesar 9,5 kV pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1, 0,8, 0,6 dan 0,4. Tabel degradasi COD untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



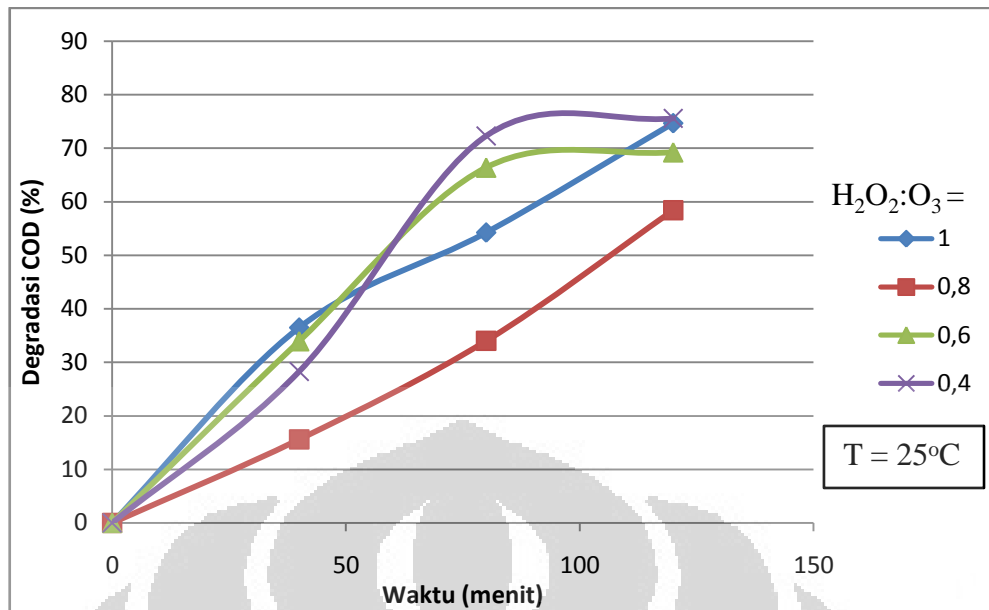
Gambar 4.14 Degradasi COD pada Tegangan 9,5 kV

Dapat dilihat pada grafik di atas bahwa pada semua rasio COD mengalami penurunan yang cukup signifikan. Dari semua titik waktu, penurunan nilai COD yang paling tinggi terdapat pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4. Sedangkan penurunan/degradasi yang paling kecil dicapai oleh rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1.

Pada titik akhir (120 menit) terlihat bahwa persen degradasi pada semua rasio mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda dan mencapai nilai paling tinggi sebesar 73,12% pada rasio 0,4. Dapat disimpulkan dari sini bahwa degradasi COD yang paling optimum untuk tegangan sekunder plasmatron pada 9,5 kV adalah saat rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4.

b. Kinerja Degradasi COD pada Tegangan Plasmatron 11 kV

Tegangan plasmatron sebesar 11 kV ini adalah berupa tegangan sekunder plasmatron atau setara dengan 200 Volt pada tegangan primer plasmatron. Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan saat tegangan sebesar 11 kV pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1, 0,8, 0,6 dan 0,4. Tabel degradasi COD untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



Gambar 4.15 Degradasi COD pada Tegangan 200 Volt

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa penurunan COD cukup signifikan pada semua rasio H_2O_2/O_3 . Pada menit 40, degradasi tertinggi dicapai pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1, sedangkan pada menit 80 dicapai pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4. Di titik akhir (120 menit) degradasi COD yang paling besar adalah saat rasio H_2O_2/O_3 1 dan 0,4 yang mempunyai nilai berdekatan. Jadi dapat disimpulkan bahwa pada tegangan 11 kV rasio H_2O_2/O_3 yang paling optimum adalah sebesar 0,4.

Sedangkan kinerja degradasi yang paling rendah dicapai oleh rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8. Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa pada semua titik waktu, nilai persen degradasi yang paling kecil terdapat pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8.

Keberadaan rasio H_2O_2/O_3 yang paling optimum pada proses perokson dapat dijelaskan melalui reaksi berikut (Busca et al, 2008).



Kelebihan jumlah hidrogen peroksida dalam jumlah yang besar dapat mengkonsumsi radikal hidroksil dan menghasilkan radikal perhidroksil (HO_2^-) yang mempunyai potensial oksidasi lebih kecil daripada HO^- (Siminiceanu, 2003). Untuk itulah rasio H_2O_2/O_3 sangat penting untuk menghasilkan suatu proses perokson yang optimum.

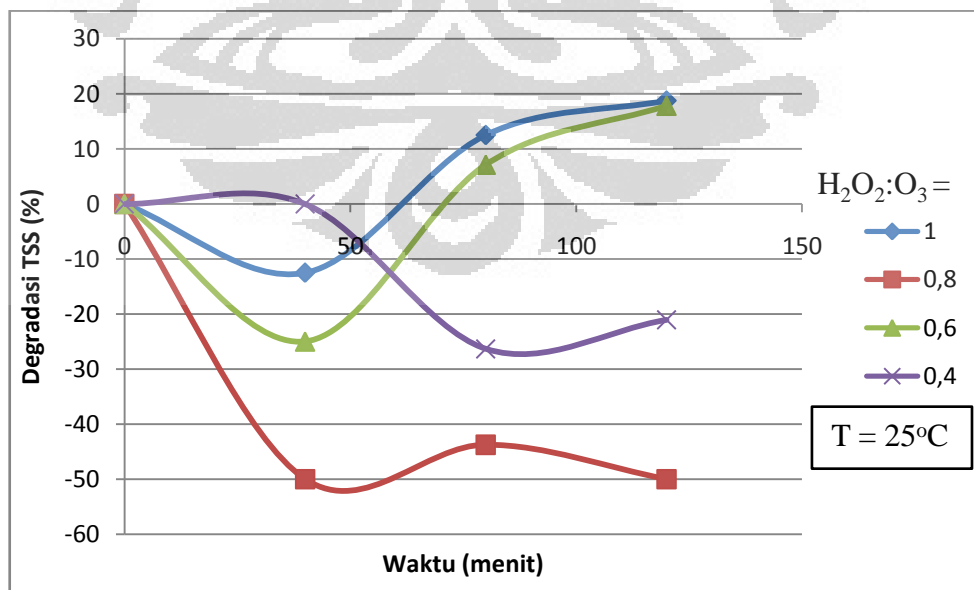
Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian pada kedua tegangan ini adalah rasio H_2O_2/O_3 yang paling optimum untuk degradasi COD dengan menggunakan proses perokson adalah sebesar 0,4, di mana proses yang paling optimum adalah saat tegangan sekunder plasmatron sebesar 11 kV yang mempunyai persen degradasi COD sebesar 75,59%.

4.2.2.2 Pengaruh Rasio H_2O_2/O_3 terhadap Perbaikan Total Suspended Solid (TSS)

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, proses perokson menghasilkan hidroksil radikal yang dapat mendegradasi molekul-molekul organik yang terdapat pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit. Dengan degradasi molekul organik ini, diharapkan kandungan TSS pada limbah tersebut juga dapat mengalami penurunan.

a. Kinerja Degradasi TSS pada Tegangan Plasmatron 9,5 kV

Tegangan plasmatron sebesar 9,5 kV ini adalah berupa tegangan sekunder plasmatron atau setara dengan 175 Volt pada tegangan primer plasmatron. Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan saat tegangan sebesar 9,5 kV pada rasio 1, 0,8, 0,6 dan 0,4. Tabel degradasi TSS untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



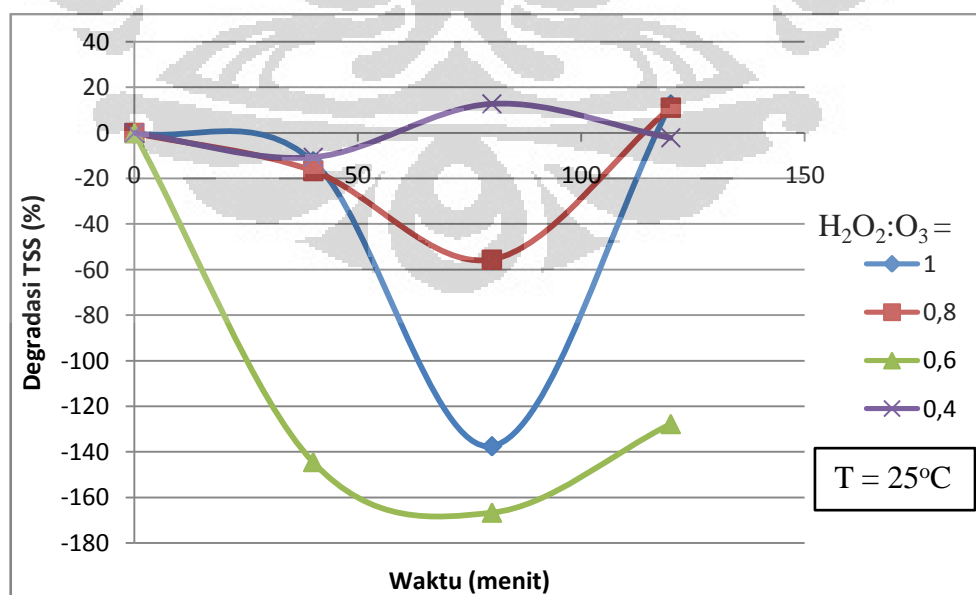
Gambar 4.16 Degradasi TSS pada Tegangan 9,5 kV

Pada tegangan ini, dapat dilihat bahwa kandungan TSS pada limbah cair cenderung tidak mengalami penurunan. Pada rasio 0,4 dan 0,8 kandungan TSS mengalami kenaikan. Sedangkan pada rasio 1 dan 0,6 kandungan TSS mengalami penurunan namun dalam jumlah yang sangat kecil yaitu sebesar 18,75% dan 17,86%.

Dapat dilihat pada grafik di atas bahwa degradasi TSS pada limbah cair mempunyai tren yang tidak jelas sehingga sangat sulit untuk menarik kesimpulan dari degradasi TSS ini. Namun, pada titik akhir (120 menit) degradasi TSS yang paling tinggi dicapai pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1. Sedangkan rasio H_2O_2/O_3 yang mempunyai persen degradasi paling kecil dicapai pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8.

b. Kinerja Degradasi TSS pada Tegangan Plasmatron 11 kV

Tegangan plasmatron sebesar 11 kV ini adalah berupa tegangan sekunder plasmatron atau setara dengan 200 Volt pada tegangan primer plasmatron. Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan saat tegangan sebesar 11 kV pada rasio 1, 0,8, 0,6 dan 0,4. Tabel degradasi TSS untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



Gambar 4.17 Degradasi TSS pada Tegangan 11 kV

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa kandungan TSS pada limbah cair cenderung tidak mengalami penurunan. Pada rasio 0,6 dan 0,4 kandungan TSS mengalami kenaikan. Sedangkan pada rasio 1 dan 0,8 kandungan TSS mengalami penurunan namun dalam jumlah yang sangat kecil yaitu sebesar 12,5% dan 11,11%.

Seperti pada tegangan 9,5 kV, grafik pada tegangan ini juga mempunyai tren yang tidak jelas sehingga sangat sulit untuk menarik kesimpulan dari proses degradasi TSS pada tegangan ini. Namun, dapat dilihat bahwa degradasi yang mempunyai nilai paling besar dicapai pada saat rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1. Sedangkan rasio H_2O_2/O_3 yang mempunyai persen degradasi paling kecil dicapai pada saat rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6.

Dapat diambil kesimpulan dari penelitian pada kedua tegangan ini bahwa proses perokson tidak dapat menurunkan kandungan TSS dan hanya pada rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1 kandungan TSS dapat turun pada kedua tegangan namun dalam jumlah yang sangat kecil. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, TSS yang mengalami penurunan adalah dalam bentuk zat organik sehingga membentuk pola grafik yang tidak beraturan, karena kandungan TSS tidak hanya terdiri zat organik saja akan tetapi terdapat partikel-partikel serta senyawa lain yang tidak teroksidasi oleh ozon (Supriyatin et al, 2010).

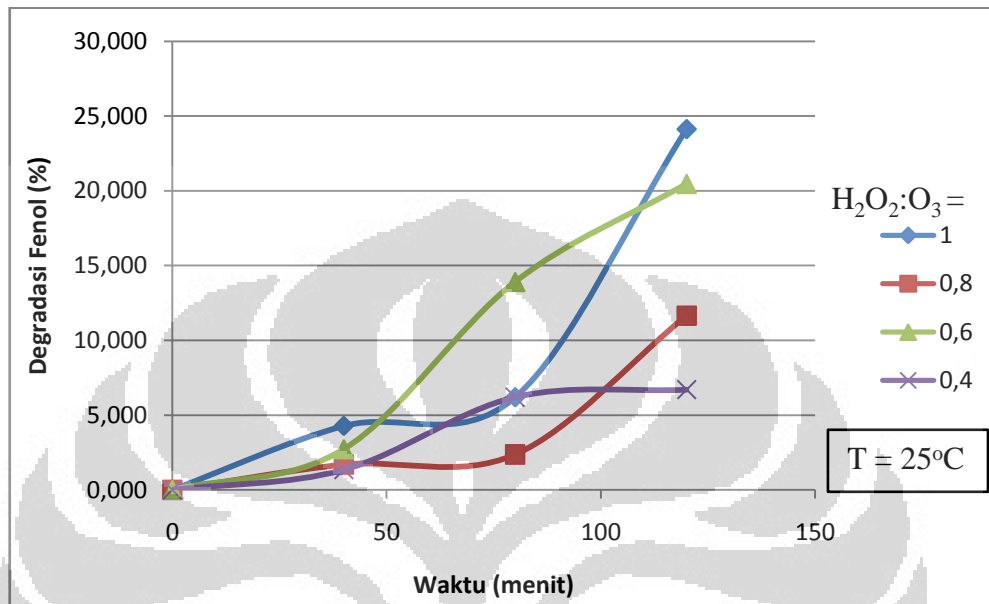
4.2.2.3 Pengaruh Rasio H_2O_2/O_3 terhadap Perbaikan Kandungan Fenol

Dalam degradasi fenol, variabel rasio H_2O_2/O_3 juga merupakan suatu parameter yang sangat penting. Sebagai contoh, untuk mendegradasi 4-klorofenol, rasio H_2O_2/O_3 yang paling optimum adalah sebesar 0,601 (Chamarro, 2001). Untuk fenol sendiri, proses perokson yang paling optimum dicapai pada rasio H_2O_2/O_3 yang lebih besar dari 0,3 (Walt dan Pearson, 2000). Pada penelitian tersebut, dilakukan investigasi terhadap beberapa nilai rasio H_2O_2/O_3 yaitu besarnya berkisar antara 0 – 0,5 dan didapatkan hasil bahwa proses paling optimum terdapat pada rasio H_2O_2/O_3 yang lebih besar dari 0,3.

a. Kinerja Degradasi Fenol pada Tegangan Plasmatron 9,5 kV

Tegangan plasmatron sebesar 9,5 kV ini adalah berupa tegangan sekunder plasmatron atau setara dengan 175 Volt pada tegangan primer plasmatron. Di

bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan saat tegangan sebesar 9,5 kV pada rasio 1, 0,8, 0,6 dan 0,4. Tabel degradasi fenol untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

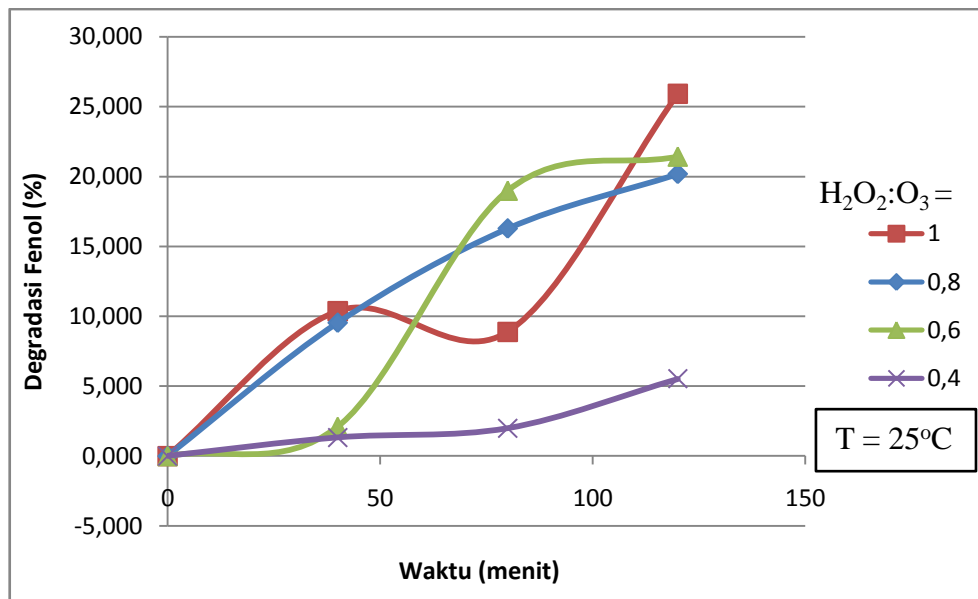


Gambar 4.18 Degradasi Fenol pada Tegangan 9,5 kV

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H₂O₂/O₃. Pada menit 40, degradasi yang paling besar terdapat pada rasio H₂O₂/O₃ sebesar 1. Sedangkan pada menit 80, dicapai pada saat rasio H₂O₂/O₃ sebesar 0,6. Pada titik akhir (120 menit), degradasi paling optimum dicapai pada saat rasio 1 yaitu sebesar 24,12%. Sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa rasio H₂O₂/O₃ yang paling optimum untuk degradasi fenol pada tegangan 9,5 kV dicapai pada saat rasio H₂O₂/O₃ sebesar 1.

b. Kinerja Degradasi Fenol pada Tegangan Plasmatron 11 kV

Tegangan plasmatron sebesar 11 kV ini adalah berupa tegangan sekunder plasmatron atau setara dengan 200 Volt pada tegangan primer plasmatron. Di bawah ini akan ditampilkan hasil percobaan saat tegangan sebesar 11 kV pada rasio 1, 0,8, 0,6 dan 0,4. Tabel degradasi fenol untuk nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.



Gambar 4.19 Degradasi Fenol pada Tegangan 11 kV

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 . Pada menit 40, rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 , sebesar 1 mempunyai degradasi yang paling besar. Sedangkan pada menit 80, degradasi paling besar dicapai pada rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6. Rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 yang mempunyai persen degradasi terbesar pada titik akhir (120 menit) dicapai oleh rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1 yaitu dengan persen degradasi sebesar 25,92%.

Dari penelitian pada kedua tegangan ini, didapatkan hasil bahwa proses perokson dapat digunakan untuk mendegradasi kandungan fenol pada limbah cair namun dengan persen degradasi yang tidak terlalu besar (sekitar 20 – 25%). Rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 yang menghasilkan proses paling optimum adalah pada saat rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1 dan rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio

H_2O_2/O_3 yang menghasilkan proses dengan degradasi fenol paling kecil dicapai oleh rasio sebesar 0,4.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Kualitas COD pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit dapat diperbaiki menggunakan proses perokson dengan persen degradasi sebesar 75,59% pada saat tegangan sekunder plasmatron sebesar 11 kV dan rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4.
2. Proses perokson tidak dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas TSS pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit.
3. Kandungan Fenol pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit dapat diperbaiki dengan proses perokson namun dengan persen degradasi yang kecil. Kondisi yang paling optimum untuk degradasi fenol didapatkan pada tegangan 11 kV dan rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1.
4. Pengaruh tegangan terhadap proses perokson menggunakan Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP) tidak signifikan karena produktifitas ozon yang dihasilkan pada kedua tegangan yang diuji besarnya tidak jauh berbeda.
5. Rasio dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol mengalami penurunan di tiap titik waktu pada semua rasio H_2O_2/O_3 merupakan suatu parameter yang penting dalam proses perokson, di mana kondisi optimumnya seperti yang telah disebutkan di atas.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang rancangan Reaktor Hibrida Ozon Plasma (RHOP) agar performa dari reaktor ini dapat lebih baik.
2. Perlu dilakukan penelitian yang hanya melibatkan RHOP (tanpa ozonator tambahan dan hidrogen peroksida) sehingga dapat diketahui dengan jelas bagaimana pengaruh penambahan kedua oksidator tambahan ini.

3. Suhu cairan (fluida) yang disirkulasi sebaiknya diukur suhunya karena kelarutan ozon pada fase cair sangat tergantung dengan penurunan ataupun kenaikan suhu cairan tersebut.
4. Penelitian tentang proses perokson perlu dilanjutkan lagi dengan penambahan variable-variabel yang lain seperti pH dan titik injeksi hidrogen peroksida.
4. Diperlukan studi lebih lanjut mengenai kandungan molekul organik apa saja yang terdapat pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit sehingga ke depannya dapat dilakukan treatment yang tepat untuk pengolahan limbah cair dari pabrik kelapa sawit ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Acar, Ebru dan Ozbelge, Tulay (2006), 'Oxidation of Acid Red-151 Aqueous Solutions by the Peroxone Process and its Kinetic Evaluation', *Ozone: Science and Engineering*, 28, 155-64.
- Adami, Aryani (2010), 'Rancang Bangun Ozonator Koaksial Tipe Aliran Double Pass untuk Pengolahan Air Bersih Dan Air Minum', (Universitas Indonesia).
- Agustina, S (2008), 'Penggunaan Teknologi Membran pada Pengelolaan Air Limbah Industri Kelapa Sawit', *Jurnal Litbang*.
- Aieta, E (1988), 'Advanced oxidation processes for treating groundwater with PCE and TCE: pilot scale evaluations', *Water Works Assoc.* 80(5):64-72.
- Amaru 'Limbah Industri Kelapa Sawit'.
<www.geocities.com/kharistya_amaru/blog/limbah-sawit.html-85k->, diakses 17 Maret 2011.
- Busca G, Berardinelli S, Resini C, Arrighi I, (2008), 'Technologies for Removal of Phenol from Fluid Streams: a short review of recent developmnet', *Journal of Hazardous Material*, 160, 265.
- Bismo, Setijo (1999), 'Teknologi ozon (I): Kajian prospek penggunaan ozon untuk pengendalian limbah industri', *Jurnal Teknologi*, No. 2 Tahun XIII, 197 – 206.
- Glaze, W.H dan Kang, J.W (1988), 'Advanced Oxidation Process for Treating Groundwater Contaminated with TCE and PCE: Laboratory Studies', *Journal American Water Works Association*. Vol. 80 No 5.
- Isroi 'Energi Terbarukan dari Limbah Pabrik Kelapa Sawit', <isroi.wordpress.com>, diakses 17 Maret 2011.
- Kaulbach, Rudiger (1993), 'AOX and COD Removal From Landfill Leachates With Ozone and Radical Reactions', *Eleventh Ozone World Congress*.
- Kementrian Lingkungan Hidup, Keputusan Menteri Lingkungan Hidup, KEPMEN LH Nomor 51/MEN LH/10/1995.
- Laing, S., Palencia, L. S., Davis, M. K. dan Bruno, J.M. (1999), 'Oxidation of MTBE by Ozone and Peroxone Processes', *Journal AWWA*, 91, 11.
- Lan, B. Y., Nigmatullin, R. dan Puma, G (2008), 'Treatment of Industrial Cork Processing Water by Ozonation and Ozone Based Advanced Oxidation

- Processes (O₃/UV and O₃/H₂O₂) in a Bubble Column Reactor', *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 11, 135-142.
- Langlais, B, *Ozone in Water Treatment* (Chelsea: Lewis Publisher).
- Lukmanto, Adi (2009), 'Rancang bangun ozonator koaksial shell and tube untuk pengolahan air bersih dan air minum', (Universitas Indonesia).
- Mark E. Zappi, Elizabeth C. Flemming, Todd Miller, Fred Ragan, Randy Swindle, Robert Morgan, Steven Harvey (1998), 'A Pilot-Scale Assessment of Peroxone Oxidation for Potential Treatment of Three Contaminated Groundwaters at the Rocky Mountain Arsenal, Commerce City, Colorado', *Strategic Environmental Research and Development Program*.
- Naibaho, P. M (1996), 'Teknologi Pengolahan Kelapa Sawit'. *Jurnal Pusat Penelitian Kelapa Sawit*.
- Nayhyndy 'Advanced Oxidation Processes (O₃/H₂O₂)' <Online>, diakses 8 April 2011.
- Nugroho, Rudi dan Iqbal (2005), 'Kinetika Proses AOPs Untuk Pengolahan Warna Air Limbah Produksi Batik', *Jurnal JAI*, 1.
- Paillard, H., Brunet, R. dan Dore, M (1988), 'Optimal conditions for applying an ozone/hydrogen peroxide oxidizing system'. *Water Res*, 22, 91–103.
- Pikatan, S (2008), 'Ozon di Atmosfir, Erosi Pada Lapisan Ozon Mengancam Kehidupan di Permukaan Bumi'. *Buletin Ilmiah Universitas Surabaya*, Vol 1 no. 1, 1 – 7.
- Rozi, F (2009), 'Studi Hidrodinamika Dan Uji Kinerja Penyisihan Logam Besi (Fe) Dan Mangan (Mn) Pada Unit Pengolahan Air Yang Menggunakan Proses Ozonasi Gelembung Mikro Dan Filtrasi Membran', (Universitas Indonesia).
- Siregar, Parpen (2009), 'Produksi Biogas Melalui Pemanfaatan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit dengan Digester Anaerob'.
- Siminiceanu. I (2003), 'Process Fotochimice Aplicata la Tratarea Apheii', *Tehnopres*, 125.
- Shukla, P (2010), 'Combined Adsorption and Oxidation Technique for Waste Water Treatment', (Curtin University of Technology).

- Sugiarto, A. T (2010), 'Pengolahan Limbah Cair Dengan COD Tinggi Menggunakan Kombinasi Metode AOP dan Karbon Aktif', *Jurnal LIPI*.
- Terry, P. A (2010), 'Application of Ozone and Oxygen to Reduce Chemical Oxygen Demand and Hydrogen Sulfide from a Recovered Paper Processing Plant', *International Journal of Chemical Engineering*, 2010, 6.
- Tjahjadi, Linda (2010), 'Penyisihan Fenol dengan Menggunakan Proses Oksidasi Lanjut Ozon/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik)', (Universitas Indonesia).
- Walt, Charl Van der dan Ian Pearson (2000), 'The Effectiveness of Peroxone as An Oxidizing Agent for The Removal of Organic Compounds from Water', *Water technology*, 237.
- Watts, R. J., Udell, M. D. dan Monsen, R. M (1993), 'Fenton process as a potential oxidant for pesticides and other soil contaminants', *Water Environ. Res*, 65, 839–844.
- Wibisono, G (1995), 'Sistem Pengelolaan dan Pengolahan Limbah Domestik', *Jurnal Science* 27.

LAMPIRAN

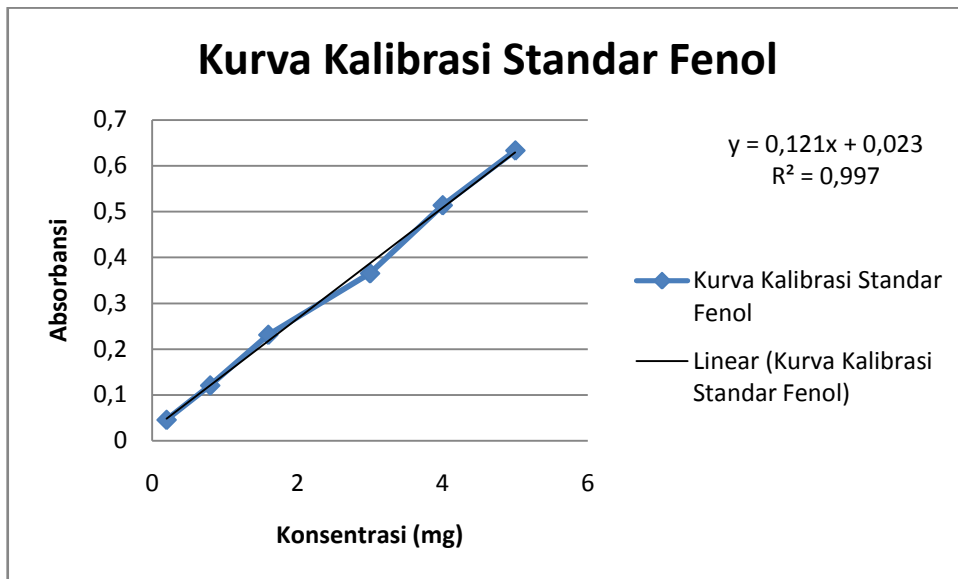
Lampiran 1. Kurva Kalibrasi Fenol

Hasil dari kalibrasi spektrofotometer adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Data Absorbansi Kurva Standar fenol

Absorbansi	Konsentrasi (mg)
0,0455	0,2
0,1205	0,8
0,231	1,6
0,365	3
0,5135	4
0,633	5

Kurva yang diperoleh dari hasil kalibrasi:



Gambar 1. Kurva standar fenol

Lampiran 2. Data Penelitian Uji COD

a. Degradasi COD pada Tegangan 9,5 kV

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Tabel 2. Degradasi COD untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 1

Waktu (menit)	COD (mg/L)	Degradasi COD (%)
0	5360	0
40	4376	18,358
80	3760	29,851
120	1520	71,642

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Tabel 3. Degradasi COD untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,8

Waktu (menit)	COD (mg/L)	Degradasi COD (%)
0	6160	0
40	4720	23,377
80	2536	58,831
120	1680	72,727

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Tabel 4. Degradasi COD untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,6

Waktu (menit)	COD (mg/l)	Degradasi COD (%)
0	5976	0
40	4296	28,112
80	3792	36,546
120	1792	70,013

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Tabel 5. Degradasi COD untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,4

Waktu (menit)	COD (mg/L)	Degradasi COD (%)
0	6400	0
40	3520	45,000
80	2560	60,000
120	1720	73,125

b. Degradasi COD pada Tegangan 11 kV

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Tabel 6. Degradasi COD untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 1

Waktu (menit)	COD (mg/L)	Degradasi COD (%)
0	5856	0
40	3720	36,475
80	2680	54,235
120	1484	74,658

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Tabel 7. Degradasi COD untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,8

Waktu (menit)	COD (mg/L)	Degradasi COD (%)
0	4000	0
40	3376	15,600
80	2640	34,000
120	1664	58,400

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Tabel 8. Degradasi COD untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,6

Waktu (menit)	COD (mg/l)	Degradasi COD (%)
0	4760	0
40	3144	33,950
80	1600	66,387
120	1464	69,244

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Tabel 9. Degradasi COD untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,4

Waktu (menit)	COD (mg/L)	Degradasi COD (%)
0	3180	0
40	2280	28,302
80	880	72,327
120	776	75,597

Lampiran 3. Data Penelitian Uji TSS

a. Degradasi TSS pada Tegangan 9,5 kV

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Tabel 10. Degradasi TSS untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 1

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	160	0
40	180	-12,5
80	140	12,5
120	130	18,75

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Tabel 11. Degradasi TSS untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3 = 0,8$

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	210	0
40	240	-50
80	230	-43,75
120	240	-50

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Tabel 12. Degradasi TSS untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,6

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	280	0
40	350	-25,000
80	260	7,143
120	230	17,857

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Tabel 14. Degradasi TSS untuk tegangan 9,5 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,4

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	190	0
40	190	0
80	240	-26,316
120	230	-21,053

b. Degradasi TSS pada Tegangan 11 kV

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Tabel 15. Degradasi TSS untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 1

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	80	0
40	90	-12,5
80	190	-137,5
120	70	12,5

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Tabel 16. Degradasi TSS untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3 = 0,8$

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	180	0
40	210	-16,667
80	280	-55,556
120	160	11,111

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Tabel 17. Degradasi TSS untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,6

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	390	0
40	440	-144,444
80	480	-166,667
120	410	-127,778

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Tabel 18. Degradasi TSS untuk tegangan 11 kV, $H_2O_2:O_3$ sebesar 0,4

Waktu (menit)	TSS (mg/L)	Degradasi TSS (%)
0	470	0
40	520	-10,638
80	410	12,766
120	480	-2,128

Lampiran 4. Data Penelitian Uji Fenol

a. Degradasi Fenol pada Tegangan 9,5 kV

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Tabel 2. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,702	5,612	0,000
40	0,673	5,372	4,271
80	0,66	5,264	6,186
120	0,538	4,258	24,122

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Tabel 3. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,615	4,893	0,000
40	0,605	4,810	1,689
80	0,601	4,777	2,365
120	0,546	4,322	11,655

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Tabel 4. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,648	5,165	0,000
40	0,631	5,025	2,720
80	0,561	4,446	13,920
120	0,52	4,107	20,480

- Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Tabel 5. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,62	4,934	0,000
40	0,612	4,868	1,340
80	0,583	4,628	6,198
120	0,58	4,603	6,700

b. Degradasi Fenol pada Tegangan 11 kV

- Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Tabel 6. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 1

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,428	3,347	0,000
40	0,386	3,000	10,370
80	0,392	3,050	8,889
120	0,323	2,479	25,926

- Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Tabel 7. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,8

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,474	3,727	0,000
40	0,431	3,372	9,534
80	0,401	3,121	16,277
120	0,383	2,975	20,177

- Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Tabel 8. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,6

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,597	4,744	0,000
40	0,585	4,645	2,091
80	0,488	3,843	18,990
120	0,474	3,727	21,429

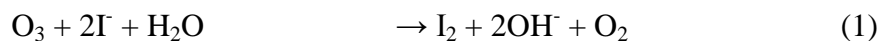
- Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

Tabel 9. Data Uji Fenol Untuk Rasio H_2O_2/O_3 sebesar 0,4

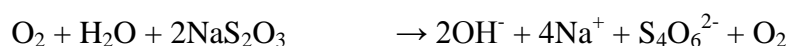
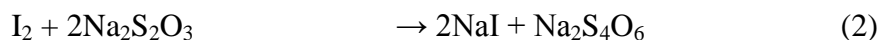
Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi Fenol (ppm)	Degradasi (%)
0	0,476	3,744	0,000
40	0,47	3,694	1,325
80	0,467	3,669	1,987
120	0,451	3,537	5,519

Lampiran 5. 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 mol $\text{O}_3 \approx 2$ mol $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

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 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
	hulu (mL)	hilir (mL)
4,59	31,76	2,16
4,35	29,6	2,8

Hasil perhitungan yang didapatkan adalah sebagai berikut:

Tabel 13. Hasil perhitungan pada Analisis Produktivitas Ozonator

M Na₂S₂O₃.5H₂O	mol Na₂S₂O₃.5H₂O	mol O₃	Massa O₃ (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