

**TUGAS AKHIR - RE 184804**

**KAJIAN PENERAPAN METODE ADVANCED OXIDATION  
PROCESS (AOPs) PADA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DI  
INDONESIA**

**MALIA LAILA NABILA**

**NRP 03211840000076**

Dosen Pembimbing

**Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.**

**NIP. 197306012000031001**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN**

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



**TUGAS AKHIR - RE 184804**

**KAJIAN PENERAPAN METODE ADVANCED OXIDATION  
PROCESS (AOPs) PADA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DI  
INDONESIA**

**MALIA LAILA NABILA**

**NRP 03211840000076**

Dosen Pembimbing

**Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.**

**NIP. 197306012000031001**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN**

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



FINAL PROJECT - RE 184804

**STUDY OF ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOPS)  
METHODS IMPLEMENTATION IN WASTEWATER  
TREATMENT IN INDONESIA**

**MALIA LAILA NABILA**

NRP 03211840000076

Advisor

**Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.**

NIP. 197306012000031001

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

Faculty of Civil, Planning and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# LEMBAR PENGESAHAN

## KAJIAN PENERAPAN METODE ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOPs) PADA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DI INDONESIA

### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **MALIA LAILA NABILA**  
NRP.0321184000076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.
2. Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng.
3. Ervin Nurhayati, S.T., M.T., Ph.D.
4. Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T.

Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji



**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

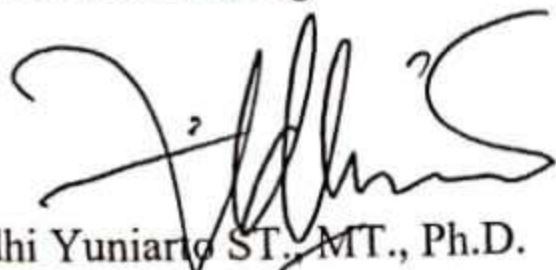
Nama mahasiswa/NRP : Malia Laila Nabila/ 03211840000076  
Departemen : Teknik Lingkungan  
Dosen Pembimbing/NIP : Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D./197306012000031001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Kajian Penerapan Metode *Advanced Oxidation Process* (AOPs) pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 20 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.  
NIP. 197306012000031001

Mahasiswa,



Malia Laila Nabila  
NRP.03211840000076

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# KAJIAN PENERAPAN METODE ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOPs) PADA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DI INDONESIA

Nama Mahasiswa/NRP : Malia Laila Nabila/ 0321184000076  
Departemen : Teknik Lingkungan  
Dosen Pembimbing : Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.

## ABSTRAK

Semakin meningkatnya jumlah penduduk dan industri di Indonesia berkolerasi positif terhadap limbah yang dihasilkan. Selain itu, jenis limbahnya pun semakin beragam sehingga dalam mengolahnya memiliki banyak kendala. Dalam mengatasi hal tersebut, Metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) mulai banyak dikembangkan karena metode ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode pengolahan yang lain, namun, literatur yang mengkaji akan penerapan tersebut masih sedikit. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang membahas mengenai sistem dan prinsip kerja serta efisiensi pencemar penerapan AOPs pada pengolahan limbah cair di Indonesia sehingga kajian ini dapat memberikan kontribusi literatur yang membahas tentang penerapan metode AOPs dan tentang penerapan metode AOPs di Indonesia.

Studi literatur ini dilakukan dengan melakukan peninjauan pustaka dari berbagai sumber karya ilmiah yang berkaitan dengan penerapan metode AOPs dalam pengolahan limbah cair di Indonesia. Kemudian dilakukan pengumpulan data primer dan sekunder dari kedua tempat dengan jenis sektor yang berbeda sebagai studi kasus. Lalu dilakukan analisis dan pembahasan berdasarkan literatur yang dikaji dan data studi kasus yang diperoleh.

Berdasarkan hasil kajian diperoleh bahwa sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia, antara lain *sonochemical*, fenton, *peroxymonosulfate*/Katalis, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/GAC, UV/Fenton/Katalis, fotofenton dan elektronfenton. Sistem tersebut dapat digunakan untuk mengolah berbagai limbah industri serta limbah domestik. Prinsip kerja sistem tersebut pada prinsipnya sama yaitu memproduksi radikal bebas yang berfungsi untuk mendegradasi kontaminan. Akan tetapi, yang membedakan adalah cara memproduksi radikal bebas tersebut. Lalu, efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs juga berbeda-beda tergantung jenis sistem AOPs yang dipakai serta faktor-faktor lain seperti kondisi pH, waktu reaksi, konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, konsentrasi reagen Fe, konsentrasi PMS, variasi debit udara, *feeding rate* ozon, dosis GAC, perbandingan molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub>, dosis katalis, tegangan listrik, jarak elektroda, rasio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/COD dan lain-lain. Sistem AOPs yang diterapkan di RSUD Banyumas yaitu sistem O<sub>3</sub>/UV ditambah media sarang tawon dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 41,67%; COD 33,3%; TSS 26,67%; Minyak dan lemak 37,5% serta Total Coliform 79,17% sedangkan sistem AOPs yang diterapkan di TPA Benowo yaitu sistem O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ditambah nanofilter dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 94,63%; COD 94,68%; TSS 95,24%; N-Total 96,71% dan Merkuri 46,15%.

**Kata kunci :** *Advanced Oxidation Process*, Indonesia, Limbah Cair, Pengolahan Limbah, Sistem

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# STUDY OF ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOPS) METHODS IMPLEMENTATION IN WASTEWATER TREATMENT IN INDONESIA

**Student Name/NRP : Malia Laila Nabila/ 03211840000076**  
**Department : Environmental Engineering**  
**Advisor : Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.**

## ABSTRACT

The increasing population and industrial growth in Indonesia are positively correlated with the increase in wastewater. In addition, the types of waste are increasingly diverse so the processing there are many obstacles. In overcoming this, Advanced Oxidation Process Methods (AOPs) have begun to be developed because it has several advantages over other methods, however, the literature needs further research. Therefore, a study about the system and principles as well as pollutant efficiency in the application of AOPs in wastewater treatment in Indonesia is needed to be discussed. So that this study can contribute literature that discusses the application of the AOPs method and the application of the AOPs method in Indonesia.

This literature study is carried out by conducting a literature review from various sources, of scientific sources related to the application of the AOPs method in wastewater treatment in Indonesia. Then, primary and secondary data were collected from two places with different types of sectors as case studies. Then analysis and discussion are carried out based on the literature reviewed and case study data obtained.

Based on the results of the study, it was found that the AOPs system implemented in Indonesia included *sonochemical*, fenton, *peroxymonosulfate*/Katalis, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/GAC, UV/Fenton/Katalis, fotofenton, and elektronfenton. The system can be used to treat various industrial waste and domestic waste. The principle of the system is the same, that is producing free radicals which function to degrade contaminants. However, what makes the difference is the method of producing these free radicals. The pollutant reduction efficiency of the AOPs system varies depending on the type of AOP system used and other factors such as pH conditions, reaction time, hydrogen peroxide concentration, Fe reagent concentration, PMS concentration, air flow variation, ozone feeding rate, GAC dose, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub> molar ratio, catalyst dose, electric voltage, electrode distance and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/COD ratio. The AOPs system applied at RSUD Banyumas is the O<sub>3</sub>/UV system coupled with honeycomb media with an efficiency of removing pollutants of BOD 41.67%; COD 33.3%; TSS 26.67%; Oils and fats 37.5% and Total Coliform 79.17%, meanwhile, the AOPs system applied at TPA Benowo is the O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system with nanofilter with a pollutant removal efficiency of BOD 94,63%; COD 94,68%; TSS 95,24%; N-Total 96,71% and Mercury 46,15%.

**Keyword(s): Advanced Oxidation Process, Indonesia, System, Wastewater, Wastewater Treatment**

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## KATA PENGANTAR

*Assalamualaikum Wr.Wb*

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat, rahmat, dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Kajian Penerapan Metode *Advanced Oxidation Process* (AOPs) pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia”. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Rasulullah, Nabi Muhammad SAW

Dalam penyusunan laporan ini, tak luput dari bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas segala kesedian, kesabaran, bimbingan dan ilmu yang telah diberikan.
2. Bapak Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng., Ibu Ervin Nurhayati, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T. selaku dosen pengarah yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Harmin Sulistiyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D. selaku koordinator tugas akhir atas segala arahan dan kepeduliannya terhadap pelaksanaan Tugas Akhir.
4. Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, S.T., M.PEM, selaku kepala Departemen Teknik Lingkungan, FTSPK-ITS atas segala dukungannya yang telah diberikan selama masa perkuliahan
5. Bapak Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T. selaku dosen wali yang selalu memberikan semangat dalam menjalani perkuliahan.
6. Keluarga penulis yang telah mendoakan, memotivasi dan memberikan dukungan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini
7. Teman - teman seperjuangan yang selalu mendukung, memberikan semangat serta motivasi kepada penulis.
8. Seluruh pihak lain yang telah ikut mendukung dan membantu penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Laporan ini tentunya masih jauh dari kata sempurna. Banyak yang harus dibenahi baik dalam teknis dan isi dari penulisan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

*Wassalamualaikum Wr.Wb*

Surabaya, 26 Juli 2022

Penulis

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Studi.....	2
1.4 Ruang Lingkup.....	2
1.5 Manfaat Studi.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Pengertian Limbah Cair .....	3
2.2 Klasifikasi Limbah Cair .....	3
2.3 Pengolahan Limbah Cair.....	3
2.3.1 Pengolahan Fisik.....	3
2.3.2 Pengolahan Kimia.....	3
2.3.3 Pengolahan Biologis .....	3
2.4 Baku Mutu Limbah Cair .....	4
2.4.1 Baku mutu Lindi .....	5
2.4.2 Baku Mutu Limbah Cair Domestik .....	5
2.4.3 Baku Mutu Limbah Cair Rumah Sakit .....	5
2.5 Metode <i>Advanced Oxidation Processes</i> .....	7
2.5.1 Jenis Jenis AOPs.....	8
2.5.1.1 <i>Sonochemical</i> .....	8
2.5.1.2 <i>Ozon Based</i> .....	11
2.5.1.3 <i>UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Photolysis)</i> .....	13
2.5.1.4 <i>Fenton Based</i> .....	13
2.5.1.5 <i>Wet Air Oxidation</i> .....	16
2.5.1.6 <i>Photocatalytic</i> .....	18
2.5.1.7 <i>Sulfate Radicals-Based Advanced Oxidation Process</i> .....	19
2.5.2 Kelebihan dan Kekurangan Metode <i>Advanced Oxidation Process</i> .....	20

2.5.3	Komponen yang digunakan pada Masing- Masing Sistem <i>Advanced Oxidation Process</i> .....	30
2.6	Limbah yang dapat Diolah dengan Metode <i>Advanced Oxidation Processes</i> .....	38
2.7	Posisi Metode <i>Advanced Oxidation Processes</i> dalam Pengolahan Limbah .....	38
2.7.1	Pre-treatment.....	38
2.7.2	Tertiary Treatment.....	39
2.8	Aplikasi Metode <i>Advanced Oxidation Processes</i> dalam Pengolahan Limbah .....	39
<b>BAB III METODE PENULISAN .....</b>		<b>55</b>
3.1	Kerangka Studi.....	55
3.2	Metode Studi .....	56
3.3.1	Ide Studi.....	57
3.3.2	Peninjauan pustaka .....	57
3.3.3	Perizinan .....	57
3.3.4	Pengumpulan Data.....	57
3.3.4.1	Pengumpulan Data Primer .....	57
3.3.4.2	Pengumpulan Data Sekunder.....	58
3.3.5	Analisis dan Pembahasan .....	58
3.3.6	Kesimpulan dan Saran .....	58
3.3	Sistematika Laporan Tugas Akhir.....	58
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>61</b>
4.1	Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia.....	61
4.1.1	Sonochemical .....	61
4.1.2	Fenton.....	61
4.1.3	Peroxymonosulfate/Katalis .....	62
4.1.4	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	63
4.1.5	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> .....	63
4.1.6	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	64
4.1.7	O <sub>3</sub> /GAC .....	64
4.1.8	UV/Fenton/ Katalis .....	65
4.1.9	Fotofenton .....	66
4.1.10	Elektrofenton.....	67
4.2	Kinerja sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia.....	69
4.2.1	Sonochemical .....	69
4.2.2	Fenton.....	70
4.2.3	Peroxymonosulfate/Katalis .....	72
4.2.4	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	73
4.2.5	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> .....	75

4.2.6	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	76
4.2.7	O <sub>3</sub> /GAC .....	77
4.2.8	UV/Fenton/ Katalis .....	81
4.2.9	Fotofenton .....	83
4.2.10	Elektrofenton .....	85
4.3	Penerapan AOPs di lokasi studi kasus .....	89
4.3.1	Penerapan AOPs di RSUD Banyumas .....	89
4.3.2	Penerapan AOPs di TPA Benowo .....	95
4.3.3	Perbandingan Kedua Studi Kasus dalam berbagai Aspek.....	100
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		103
5.1	Kesimpulan .....	103
5.2	Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....		104
LAMPIRAN .....		113
BIODATA PENULIS.....		121

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Kavitasi Akustik.....	10
Gambar 2. 2 Mekanisme Photocatalytic.....	19
Gambar 2. 3 Metode aktivasi PS beserta Bentuk Radikal Sulfat yang Dihasilkan .....	20
Gambar 2. 4 Metode aktivasi PMS beserta Bentuk Radikal Sulfat yang Dihasilkan.....	20
Gambar 2. 5 Skema Sistem Sonochemical Skala Penelitian. (1) AC Generator (2) Ultrasonic Transducer (3) Sonotrode (4) Pt100 Thermometer (5) Beaker (6) Larutan .....	30
Gambar 2. 6 Skema Sistem O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Skala Penelitian .....	31
Gambar 2. 7 Skema Sistem O <sub>3</sub> /UV Skala Penelitian.....	31
Gambar 2. 8 Skema Sistem Catalytic Ozonation Skala Penelitian.....	32
Gambar 2. 9 Skema Sistem UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Photolysis) Skala Penelitian. (I) dan (II) Photoreactors (1) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Storage (2) Multichannel Peristaltic Pumps (3) Feed tank (4) Feed Peristaltic Pumps (5) UV Lamp (6) Reaction Zone (7) Effluent Tank.	33
Gambar 2. 10 Skema Sistem Fenton Skala Penelitian.....	34
Gambar 2. 11 Skema Sistem Fotofenton Skala Penelitian .....	34
Gambar 2. 12 Skema Sistem WAO Skala Penelitian .....	35
Gambar 2. 13 Skema Sistem Photocatalytic Skala Penelitian.....	36
Gambar 3. 1 Kerangka Studi .....	56
Gambar 4. 1 Peta RSUD Banyumas.....	89
Gambar 4. 2 Diagram Alir IPAL RSUD Banyumas .....	92
Gambar 4. 3 Sketsa Sistem AOP pada IPAL RSUD Banyumas .....	93
Gambar 4. 4 TPA Benowo .....	95
Gambar 4. 5 Diagram Alir IPL TPA Benowo .....	97
Gambar 4. 6 Sketsa Sistem AOP pada IPL TPA Benowo.....	97

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Baku Mutu Lindi.....	5
Tabel 2. 2 Baku Mutu Air Limbah Domestik Tersendiri.....	5
Tabel 2. 3 Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Pelayanan Kesehatan (A) .....	6
Tabel 2. 4 Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Pelayanan Kesehatan (B).....	6
Tabel 2. 5 Agen Pengoksidasi beserta potensi oksidasi yang umum digunakan .....	8
Tabel 2. 6 Kelebihan dan Kekurangan pada Masing Masing Sistem AOPs.....	22
Tabel 2. 7 Komponen yang digunakan tiap sistem AOPs .....	36
Tabel 2. 8 Aplikasi Metode Advanced Oxidation Processes dalam Pengolahan Limbah .....	40
Tabel 4. 1 Jenis Limbah yang dapat diolah pada Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia ..	67
Tabel 4. 2 Mekanisme Proses pada Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia .....	68
Tabel 4. 3 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem Fenton .....	70
Tabel 4. 4 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem Peroxymonosulfate/Katalis .....	72
Tabel 4. 5 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	73
Tabel 4. 6 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> .....	75
Tabel 4. 7 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	76
Tabel 4. 8 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem O <sub>3</sub> /GAC.....	78
Tabel 4. 9 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem UV/Fenton/TiO <sub>2</sub> .....	81
Tabel 4. 10 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem Fotofenton .....	83
Tabel 4. 11 Kinerja Metode Advanced Oxidation Process dengan Sistem Elektrofenton .....	85
Tabel 4. 12 Kemampuan Degradasi Pencemar oleh Masing-masing Sistem AOPs.....	88
Tabel 4. 13 Karakteristik Air Limbah RSUD Banyumas .....	91
Tabel 4. 14 Rekap Data Debit Outlet Air Limbah RSUD Banyumas Tahun 2021 .....	91
Tabel 4. 15 Data Efektifitas Penurunan Parameter Pencemar oleh AOP pada IPAL RSUD Banyumas.....	94
Tabel 4. 16 Karakteristik Air Lindi TPA Benowo.....	96
Tabel 4. 17 Rekap Data Debit Air Lindi TPA Benowo Tahun 2022 (Januari-Mei).....	96
Tabel 4. 18 Data Efektifitas Penurunan Parameter Pencemar oleh AOP-NF pada IPL TPA Benowo .....	99
Tabel 4. 19 Data Perawatan dan Pemeliharaan TPA Benowo .....	99
Tabel 4. 20 Perbandingan Kedua Studi Kasus dalam Berbagai Aspek .....	100

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan penduduk terbanyak keempat di dunia. Menurut, Badan Pusat Statistik (2021b), jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2020 sebanyak 270,2 juta jiwa dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,25 persen, meningkat dibandingkan pada tahun 2019 yaitu sebanyak 268,1 juta dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,15 persen. Selain itu, menurut Badan Pusat Statistik (2021a), laju pertumbuhan PDB pada tahun 2021 Triwulan I meningkat sebesar 0,61% untuk industri migas dan 6,19% untuk industri non migas. Produk Domestik Bruto (PDB) merupakan pendapatan nasional atas barang dan jasa yang dihasilkan suatu negara pada periode tertentu. PDB merupakan salah satu indikator kinerja perekonomian pada suatu negara, sehingga semakin meningkat PDB maka semakin meningkat pula perekonomian suatu negara (Sapthu, 2013). Perkembangan penduduk dan ekonomi yang dialami suatu negara diikuti dengan meningkatnya kuantitas air limbah yang dihasilkan (Yudistira, 2022). Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 (2014), air limbah merupakan sisa dari suatu usaha dan/atau kegiatan yang berwujud cair. Air limbah yang dihasilkan ini harus menjalani proses pengolahan terlebih dahulu sebelum dilepas ke pembuangan akhir agar tidak mengakibatkan pencemaran dan kerusakan lingkungan (Khaliq, 2015).

Selain meningkatnya kuantitas air limbah yang dihasilkan, jenis limbahnya pun semakin beragam sehingga memiliki tingkat toksisitas yang berbeda-beda tergantung pada jenis dan karakteristik limbah yang dihasilkan (Enrico, 2019). Hal itu mengakibatkan terjadinya kendala dalam pengolahan limbah di Indonesia, seperti, lumpur yang dihasilkan akan semakin banyak, luas lahan untuk pengolahan terbatas serta kualitas dan kuantitas limbah berfluktuatif serta semakin toksik sehingga limbah cukup sulit untuk diolah dengan pengolahan konvensional (Ervina, 2018). Salah satu teknologi yang mulai banyak dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah *Advanced Oxidation Processes* (AOPs). Metode ini mulai banyak dikembangkan karena memiliki beberapa keuntungan seperti tidak membutuhkan lahan yang luas, mampu menguraikan segala jenis senyawa organik baik *biodegradable* maupun *non-biodegradable*, mampu mengubah limbah beracun menjadi limbah tidak beracun, mampu menguraikan zat warna, tidak menghasilkan lumpur yang harus diolah lagi seperti teknologi koagulasi/sedimentasi, dan tidak perlu adanya regenerasi atau proses pencucian untuk menjaga efisiensi proses seperti pada pemakaian absorben atau membran penyaring (Augustia et al., 2018; Linden & Mohseni, 2014).

Di Indonesia, metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) sudah mulai banyak diterapkan pada beberapa sektor seperti sektor kesehatan yaitu pada rumah sakit, sektor persampahan, sektor domestik dan lain lain. Akan tetapi, literatur yang mengkaji akan penerapan tersebut masih sangat sedikit. RSUD Banyumas dan TPA Benowo merupakan tempat yang sudah menerapkan sistem AOPs dalam pengolahan limbahnya. RSUD Banyumas merupakan rumah sakit yang terletak di Banyumas, Jawa Tengah dan TPA Benowo merupakan tempat pemrosesan akhir yang berada di Surabaya Jawa Timur. Kedua lokasi tersebut merupakan perwakilan dari masing-masing sektor yang menerapkan metode AOPs.

Studi literatur ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji mengenai sistem serta keefektifan beberapa pengaplikasian metode AOPs dalam pengolahan berbagai jenis limbah di Indonesia. Melalui studi literatur ini diharapkan dapat memberikan referensi dan sumber literatur mengenai penggunaan metode AOPs dalam pengolahan limbah cair di Indonesia.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan diungkapkan pada tugas akhir ini adalah :

1. Apa saja sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia dan bagaimana prinsip kerjanya?
2. Bagaimana efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia?
3. Bagaimana efisiensi penerapan AOPs di lokasi studi kasus?

## 1.3 Tujuan Studi

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk :

1. Mengkaji sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia dan bagaimana prinsip kerjanya.
2. Mengkaji efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia.
3. Mengkaji efisiensi penerapan AOPs di lokasi studi kasus.

## 1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup yang digunakan pada tugas akhir ini perlu ditentukan, antara lain sebagai berikut:

1. Lokasi studi kasus yaitu RSUD Banyumas dan TPA Benowo sebagai perwakilan penerapan metode AOPs di Indonesia dari berbagai sektor.
2. Data primer yang dibutuhkan yaitu kualitas air limbah pada influen sistem IPAL serta kualitas air limbah pada influen dan efluen unit AOPs.
3. Data sekunder yang dibutuhkan yaitu data laporan/ hasil analisis kualitas air limbah, data laporan debit/ kuantitas air limbah, kapasitas pengolahan IPAL, data sumber limbah yang masuk ke IPAL, dokumen perencanaan dan kriteria desain bangunan IPAL yang ada terutama unit AOPs, data mengenai operasional IPAL khususnya AOPs, kinerja proses sistem AOPs pada unit IPAL, dokumen pemeliharaan dan perbaikan IPAL khususnya unit AOPs, data mengenai AOPs dan data penunjang lainnya.
4. Baku mutu yang digunakan yaitu :
  - Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah.
  - Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemroses Akhir Sampah.
  - Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik.

## 1.5 Manfaat Studi

Manfaat yang diperoleh dari studi literatur ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi literatur yang membahas tentang penerapan metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) di Indonesia dari beberapa sektor.
2. Memberikan informasi dan rekomendasi bagi RSUD Banyumas dan TPA Benowo dalam penerapan AOPs.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengertian Limbah Cair**

Menurut Metcalf & Eddy Inc. et al. (2014), air limbah adalah air buangan yang berasal dari aktivitas di pemukiman, perdagangan, perkotaan, industri maupun pertanian. Air limbah pada hakikatnya merupakan air yang berasal dari berbagai aktivitas manusia yang mengandung pencemar dan membuatnya menjadi air yang tidak layak digunakan kembali. Ketika air limbah tidak diolah akan terakumulasi dan akan berakibat buruk bagi makhluk hidup dan lingkungan disekitarnya.

#### **2.2 Klasifikasi Limbah Cair**

Menurut Metcalf & Eddy Inc. et al. (2014), karakteristik limbah cair bergantung pada komponen yang membentuk aliran air limbah dan perubahan pada sistem pengumpulan yang digunakan. Klasifikasi limbah cair berdasarkan sumbernya, antara lain:

- a. Air limbah rumah tangga (*Domestic Sewage*)  
Air limbah rumah tangga adalah air limbah yang berasal dari tempat tinggal, fasilitas komersial, fasilitas kelembagaan dan juga fasilitas umum. Air limbah rumah tangga ini biasa disebut air limbah saniter.
- b. Air limbah industri (*Industrial Wastes*)  
Air limbah industri adalah air limbah yang didominasi oleh limbah industri.
- c. Infiltrasi/Inflow  
Infiltrasi/inflow merupakan air yang masuk ke sistem pengumpulan dengan cara tidak langsung ataupun langsung. Infiltrasi merupakan air asing yang masuk ke sistem pengumpulan melalui sambungan yang retak, pecah maupun bocor. Sedangkan inflow adalah air hujan yang masuk ke dalam sistem pengumpulan dari saluran pembuangan, *manhole*, saluran pondasi, dan lain lain.

#### **2.3 Pengolahan Limbah Cair**

Menurut Metcalf & Eddy Inc. et al. (2014), pencemar yang ditemukan dalam air limbah dapat dihilangkan dengan cara fisik, kimia maupun biologis.

##### **2.3.1 Pengolahan Fisik**

Pengolahan fisik merupakan pengolahan dimana penghilangan pencemar disebabkan oleh kekuatan fisik. Jenis pengolahan ini merupakan jenis pengolahan yang pertama kali diterapkan pada pengolahan air limbah. Contoh dari pengolahan ini yaitu flokulasi, sedimentasi, flotasi, filtrasi, adsorpsi, dan lain lain.

##### **2.3.2 Pengolahan Kimia**

Pengolahan kimia merupakan pengolahan dimana penghilangan pencemar disebabkan oleh penambahan bahan kimia atau reaksi kimia. Contoh pengolahan kimia yaitu presipitasi, transfer gas, adsorpsi, desinfeksi, dan lain lain.

##### **2.3.3 Pengolahan Biologis**

Pengolahan biologis merupakan pengolahan dimana penghilangan pencemar disebabkan oleh aktivitas biologis. Pengolahan biologis biasa digunakan untuk menghilangkan koloid atau zat organik terlarut yang mudah terurai yang ada pada air limbah. Pengolahan ini juga dapat menghilangkan nitrogen dan fosfor pada air limbah. Pengolahan biologis sangat dipengaruhi

dengan faktor lingkungan yang ada sehingga perlu tanggung jawab yang besar untuk memastikan bahwa kondisi lingkungan sesuai dan dapat dikendalikan sehingga tujuan pengolahan tercapai.

## 2.4 Baku Mutu Limbah Cair

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 (2014), baku mutu air limbah adalah batas kadar/jumlah unsur pencemar dalam air limbah dari suatu usaha atau kegiatan yang akan dibuang atau dilepas ke dalam badan air. Parameter yang terdapat pada baku mutu air limbah, antara lain:

a. *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*

*Biochemical Oxygen Demand (BOD)* merupakan jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh mikroba aerob untuk mengoksidasi atau mengurai hampir semua senyawa organik terlarut dan sebagian zat organik tersuspensi menjadi karbondioksida dan air (Royani et al., 2021; Suyasa, 2015).

b. *Chemical Oxygen Demand (COD)*

*Chemical Oxygen Demand (COD)* merupakan jumlah keseluruhan oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi atau mengurai seluruh bahan organik yang terdapat pada air (Royani et al., 2021; Suyasa, 2015).

c. *Total Suspended Solids (TSS)*

*Total Suspended Solids (TSS)* adalah material padatan baik organik maupun anorganik yang tersuspensi di dalam air. Besarnya TSS pada suatu perairan akan menutupi air dari cahaya matahari sehingga akan menurunkan kegiatan fotosintesis pada tumbuhan di dalam air. Menurunnya kemampuan fotosintesis mengakibatkan kurangnya produksi oksigen sehingga makhluk hidup di perairan akan mati. TSS pada perairan disebabkan oleh banyak faktor seperti lumpur, bahan organik, plankton dan limbah domestik sehingga menimbulkan kekeruhan yang tinggi (Jiyah et al., 2016; Suyasa, 2015).

d. Ammonia

Amonia beracun bagi hampir semua makhluk hidup. Amonia akan meracuni manusia apabila jumlah yang masuk melebihi kemampuan detoksifikasi tubuh dan akan meracuni organisme di perairan apabila konsentrasi amonia yang terlarut di perairan meningkat (Azizah & Humairoh, 2015).

e. Minyak dan Lemak

Minyak dan lemak akan menyebabkan kurangnya pancaran sinar matahari yang masuk ke dalam air. Minyak dan lemak akan menghambat aktivitas fotosintesis yang berakibat produksi oksigen berkurang sehingga hal tersebut akan mengganggu kehidupan perairan (Suyasa, 2015).

f. pH

pH merupakan derajat keasaman yang berguna untuk menyatakan tingkat keasamaan atau kebasaaan pada suatu larutan (Zulius, 2011). Nilai pH dipengaruhi oleh konsentrasi ion hidrogen pada air, jika konsentrasi ion hidrogen pada air tinggi maka pH akan kecil begitu pun sebaliknya. Kondisi pH pada suatu daerah akan mempengaruhi dinamika kimiawi senyawa dan proses biokimiawi pada suatu perairan, seperti proses nitrifikasi yang akan terhambat apabila pH turun (Suyasa, 2015).

#### 2.4.1 Baku mutu Lindi

Baku mutu lindi telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Baku mutu lindi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1 Baku Mutu Lindi**

Parameter	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
N Total	60	mg/L
Merkuri	0,005	mg/L
Kadmium	0,1	mg/L

*Sumber* : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indoneisa Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (2016)

#### 2.4.2 Baku Mutu Limbah Cair Domestik

Baku mutu limbah cair domestik itu telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik. Baku mutu limbah cair domestik dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2. 2 Baku Mutu Air Limbah Domestik Tersendiri**

Parameter	Satuan	Kadar maksimum
pH	-	6-9
BOD	mg/L	30
COD	mg/L	100
TSS	mg/L	30
Minyak & Lemak	mg/L	5
Amoniak	mg/L	10
Total Coliform	Jumlah/100mL	3000
Debit	L/orang/hari	100

*Sumber* : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indoneisa Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik (2016)

#### 2.4.3 Baku Mutu Limbah Cair Rumah Sakit

Baku mutu limbah cair rumah sakit itu telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah pada lampiran XLIV yang terdiri dari bagian A dan bagian B. Bagian A merupakan baku mutu untuk fasilitas pelayanan kesehatan yang melakukan pengolahan limbah domestik, sedangkan bagian B merupakan baku mutu untuk fasilitas pelayanan kesehatan yang melakukan pengolahan limbah bahan berbahaya dan beracun. Baku mutu limbah cair rumah sakit dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan 2.4.

**Tabel 2. 3 Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Pelayanan Kesehatan (A)**

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
<b>Fisika</b>		
Suhu	38	°C
Zat padat terlarut	2.000	mg/L
Zat padat tersuspensi	200	mg/L
<b>Kimia</b>		
pH	6-9	
BOD	50	mg/L
COD	80	mg/L
TSS	30	mg/L
Minyak & Lemak	10	mg/L
MBAS	10	mg/L
Ammonia Nitrogen	10	mg/L
Total Coliform	5000	Jumlah/100mL

*Sumber* : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 (2014)

**Tabel 2. 4 Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Pelayanan Kesehatan (B)**

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
<b>Kimia</b>		
pH	6-9	
Besi, terlarut (Fe)	5	mg/L
Mangan, terlarut (Mn)	2	mg/L
Barium, (Ba)	2	mg/L
Tembaga, (Cu)	2	mg/L
Seng, (Zn)	5	mg/L
Krom valensi enam, (Cr <sup>6+</sup> )	0,1	mg/L
Krom total, (Cr)	0,5	mg/L
Kadmium, (Cd)	0,05	mg/L
Merkuri, (Hg)	0,002	mg/L
Timbal, (Pb)	0,1	mg/L
Stanum, (Sn)	2	mg/L
Arsen, (As)	0,1	mg/L
Selenium, (Se)	0,05	mg/L
Nikel, (Ni)	0,2	mg/L
Kobal, (Co)	0,4	mg/L
Sianida, (CN)	0,05	mg/L
Sulfida, (S=)	0,05	mg/L
Flourida, (F-)	2	mg/L
Klorin bebas, (Cl <sub>2</sub> )	1	mg/L
Amoniak bebas, (NH <sub>3</sub> -N)	1	mg/L
Nitrat (NO <sub>3</sub> -N)	20	mg/L
Nitrit (NO <sub>2</sub> -N)	1	mg/L

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
Senyawa aktif biru metilen, (MBAS)	5	mg/L
Fenol	0,5	mg/L
AOX	0,5	mg/L
PCBs	0,005	mg/L
PCDFs	10	mg/L
PCDDs	10	mg/L

*Sumber* : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 (2014)

## 2.5 Metode *Advanced Oxidation Processes*

Metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) adalah salah satu atau kombinasi dari beberapa proses yang melibatkan *Ozone*, *Hydrogen Peroxide* ( $H_2O_2$ ), Sinar Ultraviolet, *Titanium Dioxide*, *Photo catalyst*, *Sonolysis* serta beberapa proses lainnya yang akan menghasilkan atau membentuk radikal bebas (Dianggoni et al., 2017) dalam jumlah yang cukup untuk proses penguraian air limbah. AOPs juga didefinisikan sebagai salah satu proses pengolahan air yang menggunakan suhu dan tekanan di sekitar serta melibatkan pembentukan radikal hidroksil dalam jumlah yang cukup untuk pemurnian air (Glaze et al., 1987 dalam Borah et al., 2020)

Radikal bebas adalah molekul yang orbit terluarnya terdapat elektron yang tidak berpasangan. Radikal bebas memiliki sifat yang sangat labil dan reaktif (Soeksmanto et al., 2007) karena terdapat elektron yang tidak berpasangan sehingga molekul tersebut akan berusaha melengkapi dengan menambah atau mengurangi elektron untuk mengisi atau mengosongkan lapisan terluarnya (Labola & Puspita, 2018). Menurut Labola & Puspita (2018), mekanisme pembentukan radikal bebas terdiri dari tiga tahap, yaitu:

- Tahap Inisiasi  
Tahap inisiasi merupakan langkah awal terciptanya spesies radikal. Secara umum, tahap ini merupakan tahap pembelahan homolitik yang jarang terjadi karena hambatan energi. Tahap ini terbentuk karena pengaruh beberapa hal yaitu suhu tinggi maupun katalis.
- Tahap Propagasi  
Tahap propagasi merupakan bagian rantai dari reaksi berantai pembentukan radikal bebas. Pada tahap ini, radikal bebas reaktif dihasilkan dan akan memicu terjadinya reaksi dengan molekul stabil lalu membentuk radikal bebas baru. Langkah propagasi sering melibatkan *hydrogen abstraction* atau *radical addition* ke ikatan rangkap.
- Tahap Terminasi  
Tahap terminasi merupakan tahap terakhir. Pada tahap ini, reaksi radikal akan berhenti ketika dua radikal saling bereaksi dan menghasilkan suatu molekul non radikal.

Umumnya, radikal bebas yang dihasilkan pada sistem AOPs berupa radikal hidroksil ( $^{\bullet}OH$ ). Radikal hidroksil merupakan oksida kuat yang dapat menghancurkan senyawa yang tidak dapat dioksidasi dengan agen pengoksidasi biasa atau konvensional (Hassaan & Nembr, 2017). Radikal hidroksil merupakan oksida kimia non selektif dan elektorfil reaktif (pemilih elektron) yang sangat reaktif. Radikal Hidroksil memiliki potensi oksidasi sebesar 2,33 V yang artinya dapat menghilangkan molekul organik dengan mudah dan sangat cepat

karena oksida tersebut akan menyerang secara agresif molekul organik yang ada (Hassaan & Nemr, 2017; Munter, 2001; Stasinakis, 2008). Menurut Stasinakis (2008), ada 3 jenis serangan yang mungkin dilakukan oleh radikal hidroksil terhadap senyawa organik organik, antara lain:

1. *Radical Addition*



2. *Hydrogen Abstraction*



3. *Electron Transfer*



Dalam persamaan (2.1) hingga (2.3), R didefinisikan sebagai senyawa organik yang bereaksi.

Selain radikal hidroksil, terdapat juga berbagai agen pengoksidasi yang lain yang umum digunakan. Agen pengoksidasi (oksidator) kimia beserta potensi oksidasinya dapat dilihat pada tabel 2.5.

**Tabel 2. 5 Agen Pengoksidasi beserta potensi oksidasi yang umum digunakan**

Agen Pengoksidasi	Potensi Oksidasi (V)	Sumber
Fluorine [F <sub>2</sub> ]	3,0	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Radikal Hidroksil [HO*]	2,80	Guerra-Rodríguez et al., (2018) ; Hassaan & Nemr, (2017)
Radikal Sulfat [SO <sub>4</sub> <sup>*-</sup> ]	2,5-3,1	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Oksigen (atomik)	2,42	Hassaan & Nemr, (2017)
Ozon [O <sub>3</sub> ]	2,1	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Persulfat [S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> ]	2,1	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Peroksimonosulfat [HSO <sub>5</sub> <sup>-</sup> ]	1,8	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Hidrogen peroksida [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]	1,8	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Permanganat [MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ]	1,7	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Hipoklorit [ClO <sup>-</sup> ]	1,49	Hassaan & Nemr, (2017)
Klorin [Cl <sub>2</sub> ]	1,4	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Klorin Dioksida [ClO <sub>2</sub> ]	1,5	Guerra-Rodríguez et al., (2018)
Oksigen (molekular)	1,23	Hassaan & Nemr, (2017)

Menurut Mazille & Spuhler (2013), mekanisme dari metode AOPs terdiri dari 3 langkah yang akan dijelaskan sebagai berikut:

- Langkah pertama yaitu pembentukan oksida kuat seperti radikal hidroksil.
- Kemudian, terjadi reaksi antara oksida kuat dengan senyawa organik di dalam air limbah yang menghasilkan produk intermediet yang *biodegradable*.
- Lalu, terjadi reaksi yang disebut mineralisasi antara produk intermediet dengan oksida kuat yang menghasilkan air, karbon dioksida dan garam anorganik.

## 2.5.1 Jenis Jenis AOPs

AOPs memiliki berbagai teknik untuk menghasilkan oksida kuat yang layak untuk dipertimbangan seperti

### 2.5.1.1 Sonochemical

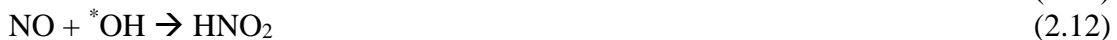
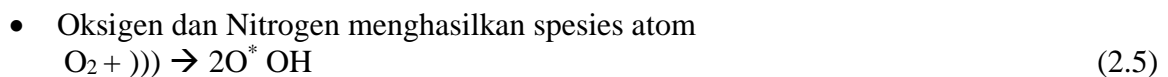
Proses *sonochemical* ini merupakan suatu proses yang melibatkan gelombang ultrasonik sehingga menghasilkan senyawa radikal \*OH dalam larutan air. Ultrasonik dianggap sebagai *advanced oxidation process* karena kemampuannya dalam menghasilkan senyawa radikal tersebut. Ultrasonik merupakan gelombang suara dengan frekuensi diatas frekuensi yang terdeteksi oleh telinga manusia, biasanya berkisar antara 20-10.000 kHz. Alat yang



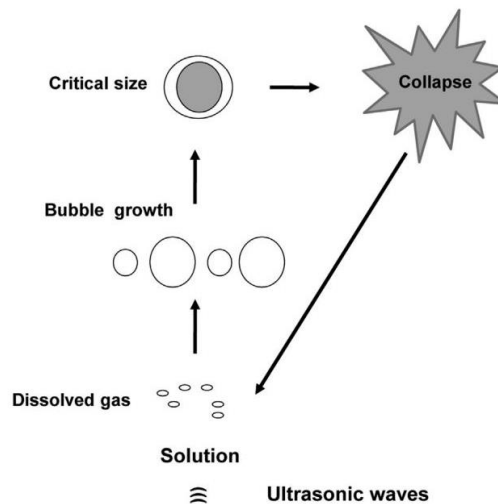
digunakan untuk menghasilkan gelombang ultrasonik tersebut dalam pengolahan limbah yaitu alat *sonicator* atau reaktor ultrasonik (Kusuma et al., 2017). Menurut Torres-Palma & Serna-Galvis (2018), Gelombang Ultrasonik berdasarkan frekuensinya dibagi menjadi tiga jenis yaitu:

1. Frekuensi rendah  
Gelombang Ultrasonik yang berfrekuensi rendah berkisar antara 20-100 kHz dan biasanya digunakan untuk proses kimia.
2. Frekuensi tinggi  
Gelombang Ultrasonik yang berfrekuensi tinggi berkisar antara 200-1.000 kHz. Seperti halnya gelombang ultrasonik rendah dan biasanya juga digunakan untuk proses kimia.
3. Frekuensi sangat tinggi  
Gelombang Ultrasonik frekuensi sangat tinggi berkisar antara 5000-10.000 kHz dan biasanya digunakan dalam diagnosa medis.

Ketika gelombang ultrasonik dengan intensitas yang tinggi berinteraksi dengan gas terlarut dalam media cair, hal tersebut akan mendorong terjadinya kavitasi akustik. Kavitasi akustik yaitu suatu proses pembentukan, pertumbuhan dan penghancuran rongga yang melepaskan energi lokal dengan membangkitkan *hot spot* dan radikal bebas yang sangat reaktif (Kusuma et al., 2017). Pembentukan gelembung terjadi selama pemuaiian ketika gelombang memiliki intensitas yang cukup untuk melebihi gaya molekuler cairan. Gelembung tersebut terus menerus menyerap energi dari siklus kompresi dan ekspansi pada gelombang ultrasonik secara bergantian sehingga gelembung tersebut bertumbuh hingga mencapai ukuran kritis dan kemudian runtuh (Torres-Palma & Serna-Galvis, 2018). Keruntuhan gelembung tersebut bertindak menjadi “*hot spot*” lokal yaitu dengan kondisi suhu 5000 K, tekanan 1000 atm dan dalam waktu yang singkat. Saat itulah terjadi beberapa proses kimia terjadi yaitu rusaknya molekul air dan gas, seperti pada persamaan berikut:



(Torres-Palma & Serna-Galvis, 2018)



**Gambar 2. 1 Proses Kavitas Akustik**

*Sumber: Torres-Palma & Serna-Galvis (2018)*

Proses *sonochemical*, terbagi menjadi 3 wilayah, yaitu (Torres-Palma & Serna-Galvis, 2018) :

1. Wilayah dalam rongga gelembung  
Pada wilayah ini, molekul volatil dan hidrofobik terdegradasi melalui reaksi pirolitik dikarenakan suhu ekstrim yang terjadi di dalam rongga gelembung. Radikal hidroksil ikut andil dalam reaksi pirolitik ini walaupun kecil.
2. Wilayah *Interface* antara gelembung dengan media cair  
Reaksi radikal hidroksil mendominasi pada wilayah ini dan terjadi eliminasi senyawa nonvolatil hidrofobik oleh reaksi tersebut.
3. Wilayah media cair (*The bulk solution*)  
Pada wilayah ini, radikal bebas yang berpindah dari wilayah *interface* ke dalam cairan akan menciptakan reaksi sonokimia sekunder.

Penerapan *sonochemical* pada remediasi air bergantung pada beberapa parameter operasional seperti frekuensi ultrasonik, gas terlarut, daya akustik, suhu cairan dan konsentrasi awal polutan (Torres-Palma & Serna-Galvis, 2018).

- Frekuensi Ultrasonik  
Frekuensi ultrasonik mempengaruhi proses kavitas karena dapat memodifikasi ukuran gelembung dan waktu runtuhnya rongga gelembung. Semakin tinggi frekuensi membuat waktu keruntuhan semakin singkat dan ukuran gelembung semakin kecil. Frekuensi yang lebih tinggi akan menginduksi lebih banyak peristiwa kavitas per waktu, fluks gas dan meningkatnya zat volatil menuju gelembung. Akan tetapi, pembentukan radikal tertinggi bukan terjadi pada frekuensi tertinggi yaitu pada frekuensi sekitar 200-350 Hz.
- Gas Terlarut  
Sifat sifat gas terlarut seperti rasio panas spesifik ( $\gamma$ ), konduktivitas termal (Q) dan kelarutan dalam air mempengaruhi aktivitas *sonochemical* rasio panas spesifik ( $\gamma$ ) berkaitan dengan temperatur ledakan maksimum sedangkan konduktivitas termal (Q)

berkaitan dengan menentukan laju perpindahan panas ke cairan disekitarnya. Maka dari itu,  $\gamma$  tinggi dan  $Q$  rendah akan mendorong suhu menjadi tinggi selama ledakan gelembung kavitas. Selain itu, untuk kelarutan tinggi akan menyediakan banyak *nucleation site* untuk kavitas yang membuat jumlah gelembung meningkat pada media.

- **Input Daya**

Daya merupakan energi yang dipancarkan oleh pelat bergetar atau probe dalam bentuk gelombang ultrasonik. Terkadang daya dibagi volume larutan untuk menunjukkan densitas daya. Semakin tinggi kekuatan ultrasonik maka akan semakin banyak terjadinya aktivitas *sonochemical* dalam media cair. Hal tersebut berlaku untuk semua jenis zat, baik volatil, hidrofobik maupun hidrofilik. Semakin tinggi daya semakin cepat terdegradasinya polutan karena peristiwa kavitas dan produksi radikal hidroksil semakin banyak. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya akumulasi hidrogen peroksida yang lebih besar ketika daya bertambah. Namun, daya tidak akan berpengaruh terhadap peningkatan degradasi polutan jika ukuran gelembung kavitas telah konstan.

- **Efek dari *Bulk Temperature***

Suhu maksimum yang dihasilkan selama keruntuhan gelembung tergantung pada *the liquid bulk temperature*, sehingga parameter ini mempengaruhi aktivitas sonokimia. Peningkatan suhu dalam mendegradasi polutan memiliki pengaruh yang berbeda tergantung seberapa besar frekuensinya. Pada frekuensi rendah, peningkatan suhu akan mengurangi terjadinya degradasi polutan karena pada saat suhu dinaikkan, viskositas akan berkurang dan tekanan uap akan meningkat sehingga gelembung mengandung lebih banyak uap air dibanding gas dan akan meredam ledakan gelembung. Pada frekuensi tinggi, peningkatan suhu akan membuat gelembung kavitas yang terbentuk memiliki sifat gas yang dominan, jumlah gelembung kavitas lebih banyak dan laju produksi radikal lebih tinggi sehingga memudahkan dalam mendegradasi polutan seperti Rhodamin B. Namun, setelah suhu tertentu. Peningkatan suhu akan menurunkan kemampuan degradasi.

- **Konsentrasi awal polutan.**

Konsentrasi awal polutan bervariasi tergantung pada jenis limbah yang dihasilkan dan sumber airnya. Biasanya, parameter ini dievaluasi selama proses degradasi polutan organik yang dilakukan oleh *sonochemical process*. Selain itu, sifat kimia senyawa juga mempengaruhi parameter ini. Untuk zat volatil, laju degradasi polutan menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal polutan organik. Hal tersebut karena ketika konsentrasi awal polutan meningkat, maka lebih banyak molekul yang berdifusi ke dalam gelembung kavitas, lalu suhu dan tekanan dalam gelembung akan menurun sehingga melemahkan keruntuhan kavitas, sehingga degradasi polutan menurun. Sedangkan untuk senyawa nonvolatil hidrofobik dan hidrofilik, laju degradasi polutan meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal polutan organik. Hal itu karena ketika konsentrasi polutan nonvolatil meningkat karena lebih banyak molekul yang dekat dengan interface gelembung kavitas sehingga reaksi radikal dan proses termal terjadi yang mengakibatkan laju degradasi polutan pun meningkat.

### **2.5.1.2 Ozon Based**

Ozon merupakan gas yang sangat reaktif dengan kelarutan terbatas dalam air. Oleh karena itu, reaksi ozon dalam media aqueous menjadi rumit. Namun, setelah dilarutkan dalam

air, ozon berfungsi sebagai oksidan karena memiliki potensi redoks yang tinggi yaitu sebesar 2,07 V. Terdapat dua cara ozon bereaksi dengan senyawa anorganik dan organik, yaitu langsung dengan menggunakan molekul ozon dan tidak langsung dengan menggunakan radikal hidroksil. Reaksi tidak langsung tersebut merupakan dasar dari mekanisme ozon based dalam AOPs (Ikehata & Li, 2018).

- $O_3/H_2O_2$

$O_3/H_2O_2$  merupakan AOPs *ozon based* yang paling banyak dipelajari dan diterapkan baik untuk pengolahan air maupun air limbah. Pada konsentrasi hidrogen peroksida yang rendah ( $10^{-5}$ - $10^{-4}$  M), dekomposisi ozon dalam air akan lebih cepat sehingga konsentrasi radikal hidroksil meningkat. Pada penelitian yang dilakukan oleh Staehelin & Hoigne' (1982), ditemukan bahwa satu satunya bentuk ionik hidrogen peroksida yaitu  $HO_2^-$  bereaksi dengan ozon dan menghasilkan radikal bebas. Berikut persamaannya:



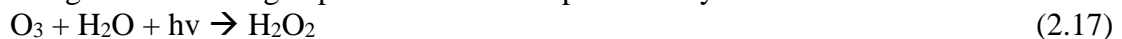
Selain itu, reaksi sistem ini untuk memproduksi radikal hidroksil ditunjukkan pada reaksi berikut.



Dikarenakan konstanta laju reaksi sangat besar (dalam orde  $10^6$  M/s) dan adanya hidrogen peroksida membuat ozon terurai dengan sangat cepat sehingga sangat efektif untuk mendegradasi kontaminan. Diketahui pula bahwa ratio 2 mol ozon/ mol hidrogen peroksida merupakan stoikiometri yang optimum dalam proses tersebut. Dalam sistem  $O_3/H_2O_2$ , reaktivitas kontaminan terhadap molekul ozon menjadi sangat tinggi yaitu  $10^6$  M/s, sehingga banyak kontaminan yang terdegradasi secara tidak langsung oleh radikal hidroksil (Ikehata & Li, 2018).

- $O_3/UV$

$O_3/UV$  merupakan sistem AOPs yang mengkombinasikan  $O_3$  dengan radiasi sinar UV. Pada sistem ini, molekul ozon terlarut akan menyerap sinar UV dengan serapan puncak pada 260 nm dan absorptivitas molar  $3292 \pm 70$  M/cm. Selama penyinaran UV, molekul ozon terlarut akan mengalami reaksi fotolisis dan menghasilkan hidrogen peroksida. Berikut persamaanya :



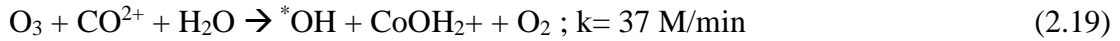
Hidrogen peroksida yang terbentuk dalam persamaan itu akan menginisiasi terjadinya dekomposisi ozon atau dapat juga mengalami reaksi fotolisis lain untuk membentuk dua radikal hidroksil.



Disamping reaksi ozon dan reaksi radikal hidroksil pada (2.18), kontaminan juga di fotolisis apabila kontaminan menyerap sinar UV sekitar 254 nm ketika lampu UV uap merkuri bertekanan rendah serta dengan absorptivitas molar yang signifikan (Ikehata & Li, 2018).

- *Catalytic Ozonation*

Berbagai proses ozonasi katalitik baik homogen maupun heterogen telah diuji dalam pengolahan air dan air limbah dan didapatkan hasil bahwa ion logam transisi seperti kobalt (II), nikel (II), tembaga (II), besi (II), mangan (II) dan seng (II) dapat meningkatkan degradasi kontaminan dalam air. Hill(1984) yang pertama kali melaporkan tentang dekomposisi ozon dengan katalis homogen kobalt(II) dalam media asam yang dapat dilihat pada persamaan (2.19).



Pada persamaan tersebut terjadi pembentukan radikal hidroksil melalui oksidasi ion kobalt (II) dengan ozon, sehingga *catalytic ozonation* termasuk dalam sistem AOPs. Selain ion logam terlarut, berbagai oksida logam seperti tembaga (II) oksida (CuO, mangan oksida (MnO<sub>2</sub>), Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) dan Besi Oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), paladium dan karbon aktif juga berperan sebagai katalis heterogen dekomposisi ozon. *Catalytic ozonation* ini dapat digunakan dalam pengolahan air limbah terutama air limbah industri yang berkekuatan tinggi dan lindi TPA yang mengandung kontaminan organik *non-biodegradable* dengan konsentrasi tinggi (Ikehata & Li, 2018).

### 2.5.1.3 UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Photolysis)

Sistem UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> terdiri dari penambahan hidrogen peroksida dan sinar UV sehingga dihasilkan radikal hidroksil (\*OH). Keuntungan utama dari penggunaan sistem ini adalah adanya radiasi sinar UV pada sistem yang dapat bekerja sebagai disinfektan dengan menonaktifkan mikroorganisme secara fisik dan radiasi sinar UV dapat membantu dalam proses fotolisis peroksida yang merupakan proses pemecahan menjadi radikal hidroksil yang sangat reaktif (Mierzwa et al., 2018). Berikut reaksi yang terjadi pada sistem ini:



Mekanisme pembentukan radikal hidroksil dari dekomposisi hidrogen peroksida yang di fotoinduksi, berasal dari pembelahan homolitik ikatan O-O yang diawali dengan langkah inisiasi (2.20) lalu diikuti dengan langkah propagasi (2.21 dan 2.22). Langkah propagasi merupakan reaksi dekomposisi hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen. Setelah langkah propagasi, terjadi reaksi terminasi berbeda yang melibatkan rekombinasi radikal-radikal (2.23, 2.24 dan 2.25). Produksi radikal hidroksil (\*OH) dipengaruhi banyak faktor, seperti panjang gelombang radiasi UV, jenis lampu UV yang digunakan, transmisi sinar UV dari lengan kuarsa, panjang jalur optik dalam media reaktor dan sifat optik limbah seperti penyerapan radiasi UV oleh bahan kimia tertentu (Mierzwa et al., 2018).

### 2.5.1.4 Fenton Based

Sistem AOPs berbasis fenton terdiri dari metode fenton konvensional, fotofenton dan elektrofenton.

- Metode Fenton Konvensional

Metode fenton dideskripsikan sebagai potensi oksidatif dari H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ketika besi (Fe) digunakan sebagai katalis dalam kondisi asam. Metode ini pertama kali dilaporkan oleh H.J. Fenton pada tahun 1894 (Ameta et al., 2018). Reaksi yang terlibat dalam metode ini adalah sebagai berikut (Darmadi, 2014):



Pertama, reaksi yang terjadi di dalam larutan yaitu reaksi antara ion Fe<sup>2+</sup> dengan hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) dan menghasilkan Fe<sup>3+</sup> dan radikal hidroksil. Ion Fe<sup>3+</sup> yang

dihasilkan dari reaksi pertama bereaksi juga dengan hidrogen peroksida membentuk ion  $Fe^{2+}$ , radikal superoksida ( $O^{*2-}$ ) dan ion hidrogen ( $H^+$ ). Lalu, radikal superoksida ( $O^{*2-}$ ) yang terbentuk akan bereaksi dengan ion  $Fe^{3+}$  yang ada dan membentuk ion  $Fe^{2+}$  dan oksigen ( $O_2$ ). Kemudian kontaminan yang ada bereaksi dengan radikal hidroksil dan menghasilkan produk yang sudah terdegradasi (Darmadi, 2014).

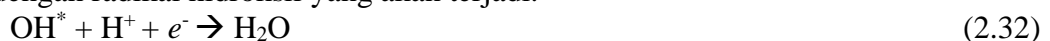
Radikal Hidroksil ( $OH^*$ ) yang didapatkan merupakan oksidan yang sangat kuat sehingga dapat langsung mendekomposisi senyawa organik pada limbah menjadi air, karbon dioksida dan senyawa inorganik (Setiawan et al., 2020). Menurut Setiawan et al. (2020), terdapat hal hal yang perlu diperhatikan pada saat proses fenton terjadi, seperti:

- pH awal

pH awal sangat mempengaruhi pembentukan  $OH^*$ . pH optimal pada masing masing limbah berbeda. Untuk pH awal yang dianjurkan pada limbah rumah sakit yaitu berkisar antara 3-5 (kondisi asam), karena pH pada kondisi tersebut menghasilkan jumlah  $OH^*$  maksimum dan mengoksidasi senyawa organik. Selain itu, pada pH rendah akan membantu pembentukan hidrogen peroksida karena oksigen mengkonsumsi proton dalam larutan asam seperti dalam persamaan berikut:

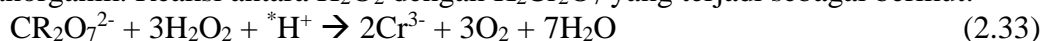


Jika pH lebih tinggi dari 5, proses oksidasi dengan metode fenton akan menurun dikarenakan dekomposisi hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen, terjadi penonaktifan ion besi menjadi kompleks hidroksido besi dan juga penurunan potensi radikal hidroksil. Namun, pH terlalu rendah juga tidak dianjurkan dikarenakan memiliki konsentrasi  $H^+$  yang terlalu tinggi dan akan cenderung bereaksi dengan radikal hidroksil sehingga mengakibatkan laju oksidasi menurun dan degradasi senyawa organik melambat. Berikut reaksi antara konsentrasi  $H^+$  dengan radikal hidroksil yang akan terjadi:



- Rasio COD/ $H_2O_2$

Jumlah  $H_2O_2$  yang ditambahkan pada limbah penting untuk diperhatikan dikarenakan jumlah  $H_2O_2$  yang terlalu banyak akan mengurangi radikal hidroksil dan juga berdampak pada nilai ekonomis dari pengolahan limbah karena akan menaikkan biaya pengolahan limbah. Selain itu, pada pengolahan limbah tekstil, kelebihan  $H_2O_2$  dapat mengganggu proses analisis COD dan sisa  $H_2O_2$  akan bereaksi dengan  $K_2Cr_2O_7$  dan mengakibatkan peningkatan jumlah senyawa anorganik. Reaksi antara  $H_2O_2$  dengan  $K_2Cr_2O_7$  yang terjadi sebagai berikut:

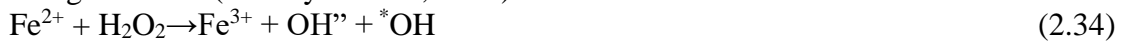


Namun, kekurangan  $H_2O_2$  juga tidak dianjurkan karena akan menyebabkan kekurangan radikal hidroksil sehingga  $OH^*$  yang dihasilkan tidak akan mencukupi proses sehingga jumlah  $H_2O_2$  yang digunakan harus sesuai. Volume  $H_2O_2$  sangat bergantung pada nilai COD awal pada limbah maka perlu adanya rasio  $H_2O_2$ /COD yang optimal agar jumlah  $H_2O_2$  yang ditambahkan dapat ditentukan dengan baik. Pada pengolahan limbah rumah sakit yang dilakukan oleh Setiawan et al. (2020), rasio COD/ $H_2O_2$  yang optimal adalah 10 (g/g).

- Fotofenton

Foto fenton merupakan sistem dengan mengkombinasikan reaksi fenton dengan radiasi sinar UV. Dengan menggunakan sistem ini akan meningkatkan degradasi polutan organik dan meningkatkan tingkat mineralisasi. Efek positif dari radiasi UV

terhadap laju degradasi ini dikarenakan terjadi proses fotoreduksi ion  $\text{Fe}^{3+}$  menjadi ion  $\text{Fe}^{2+}$  yang merupakan suatu tahapan untuk menghasilkan  $^*\text{OH}$  dan meregenerasi ion  $\text{Fe}^{2+}$  yang nantinya akan bereaksi dengan molekul  $\text{H}_2\text{O}_2$  dalam sistem (Linden & Mohseni, 2014). Persamaan mekanisme yang terjadi pada fotofenton dapat dilihat sebagai berikut (Wardiyati et al., 2012).



Peningkatan yang terjadi karena sinar UV (photo-enhancement) dapat diamati dalam proses ini. Peningkatan tersebut terjadi karena fotokimia  $\text{Fe}^{3+}$  seperti (Linden & Mohseni, 2014):

- 1) Fotoreduksi  $\text{Fe}^{3+}$  menjadi  $\text{Fe}^{2+}$
- 2) Fotodekarboksilasi kompleks besi karboksilat
- 3) Fotolisis  $\text{H}_2\text{O}_2$

Pada proses Fotoreduksi  $\text{Fe}^{3+}$  menjadi  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  hidroksi kompleks yang berada dalam kondisi agak asam seperti  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$  akan mengalami reaksi sebagai berikut (Linden & Mohseni, 2014).



Reaksi ini bergantung pada panjang gelombang, jika panjang gelombang meningkat akan menurunkan hasil kuantum pembentukan ion  $^*\text{OH}$  dan  $\text{Fe}^{2+}$  yang terjadi pada reaksi (2.36). Selain  $^*\text{OH}$  yang dihasilkan pada reaksi tersebut, juga terdapat  $\text{Fe}^{2+}$  yang dapat berpartisipasi dalam reaksi fenton dan menghasilkan  $^*\text{OH}$  tambahan sehingga akan mempercepat laju degradasi kontaminan organik. Oleh karena itu, terjadinya fotokimia  $\text{Fe}^{3+}$  pada fotofenton akan menguntungkan karena besi yang tereduksi akan bereaksi dengan  $\text{H}_2\text{O}_2$  untuk memproduksi  $^*\text{OH}$ . Akan tetapi, sistem ini juga memiliki kelemahan yaitu, adanya senyawa besi kompleks yang menyerap dengan kuat sehingga reaksi ini hanya berkontribusi sedikit pada fotodegradasi kontaminan organik (Linden & Mohseni, 2014).

- Elektrofenton

Electrochemical advanced oxidation processes (EAOPs) baru-baru ini mendapat banyak perhatian karena termasuk metode yang ramah lingkungan dalam meremediasi air dan elektrofenton merupakan metode EAOPs yang paling populer. Elektrofenton memiliki konfigurasi dua yang berbeda. Proses yang pertama yaitu reagen fenton ditambahkan ke reaktor dari luar dan elektroda inert dengan aktivitas katalitik tinggi digunakan sebagai bahan anoda, dan pada konfigurasi kedua yaitu hanya hidrogen peroksida yang ditambahkan dari luar,  $\text{Fe}^{2+}$  didapatkan dari oksidasi pada anoda besi (Nidheesh & Gandhimathi, 2012). Selain itu, dalam proses elektrofenton terjadi juga generasi in-situ hidrogen peroksida dari proses reduksi antara dua elektron  $\text{O}_2$  terlarut dalam kondisi asam (Bañuelos et al., 2014; Nidheesh & Gandhimathi, 2012; Oturan & Oturan, 2018; Paramo-Vargas et al., 2015).

Berikut persamaan mekanisme elektrofenton:



Persamaan (2.37) merupakan proses pembentukan hidrogen peroksida secara insitu. Lalu, terjadi reaksi fenton (2.38) yang dikatalis oleh ion besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ) dan menghasilkan radikal hidroksil dengan jumlah besar. Kemudian, pada persamaan (2.39) dan (2.40), radikal hidroksil yang dihasilkan bereaksi dengan ion Fe dan kontaminan atau yang dapat disebut sebagai proses degradasi (Paramo-Vargas et al., 2015).

### 2.5.1.5 Wet Air Oxidation

*Wet Air Oxidation* (WAO) adalah salah satu proses *advanced oxidation process* yang memanfaatkan oksigen atau udara sebagai oksidator zat organik maupun anorganik di lingkungan bertekanan dan bersuhu tinggi. Kondisi ekstrem ini yang dapat menimbulkan terbentuknya radikal bebas seperti radikal hidroksil yang akan mendegradasi zat beracun pada limbah. Maka dari itu, suhu dan tekanan merupakan faktor pengendali dalam proses ini (Azizah & Humairoh, 2015; Patria et al., 2015; Ray et al., 2020).

WAO merupakan sebuah proses fase aqueous sehingga air merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dari proses ini. Untuk mempertahankan air dalam fase cair dan memastikan reaksi oksidasi berlangsung dalam fase tersebut, perlu memperhatikan beberapa kondisi yaitu memiliki suhu tinggi sekitar 100-372<sup>0</sup>C (Patria et al., 2015) atau 150-400<sup>0</sup>C (Ray et al., 2020), tekanan sistem dipertahankan diatas tekanan uap (Patria et al., 2015) atau sekitar 2-40 Mpa (Ray et al., 2020) dan dengan waktu tinggal berkisar 15-120 menit (Patria et al., 2015).

Pada proses WAO, bahan organik yang tidak larut akan diubah menjadi senyawa organik larut yang lebih sederhana sehingga saat terjadi proses oksidasi akan diubah menjadi karbon dioksida dan air. Tidak seperti proses termal lainnya, WAO ini tidak menghasilkan NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, dioksin, furan dan *fly ash* dalam prosesnya. Selain itu, proses ini juga stabil apabila ingin mengubah senyawa nitrogen menjadi amonia dan juga proses ini direkomendasikan untuk proses *pretreatment* karena dapat mendekomposisi polutan secara oksidatif lengkap maupun parsial menjadi senyawa dengan berat molekul rendah yang nantinya memudahkan proses biologis konvensional dalam mengolah limbah. Namun, proses ini juga memiliki kelemahan yaitu sulit dilakukan mineralisasi secara keseluruhan karena adanya akumulasi senyawa teroksidasi dengan berat molekul rendah dalam limbah yang menahan transformasi lebih lanjut yaitu dari zat menjadi karbon dioksida (Luck, 1999; Patria et al., 2015; Ray et al., 2020).

Menurut Zhou et al. (2018), terdapat beberapa parameter operasi yang akan mempengaruhi berjalannya sistem *wet air oxidation* ini, diantaranya:

#### a. Suhu

Suhu memiliki peran yang sangat penting dalam proses *wet air oxidation* dikarenakan suhu dapat mempengaruhi laju reaksi serta mempengaruhi penyisihan COD dan TOC. Bahkan, mekanisme reaksi dapat berubah tergantung dengan kisaran suhu yang ada karena beberapa jenis radikal akan memicu kenaikan suhu. Suhu juga diperlukan untuk mengatasi hambatan energi aktivasi dalam proses *wet air oxidation*. Semakin tinggi energi aktivasi dalam proses *wet air oxidation*, maka membutuhkan suhu reaksi yang semakin tinggi juga untuk mengatasinya.

#### b. Tekanan Oksigen

Tekanan parsial oksigen dapat mempengaruhi kinetika reaksi dan distribusi intermediet pada proses *wet air oxidation*. Pada suhu tinggi, konsentrasi oksigen terlarut mengalami penurunan sehingga diperlukan tekanan parsial oksigen yang lebih tinggi untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dalam larutan. Kinetika reaksi terdiri dari dua periode yaitu periode induksi dan periode reaksi cepat. Selama periode induksi, penyisihan pencemar rendah dikarenakan konsentrasi radikal bebas pada periode ini juga rendah. Sedangkan selama periode reaksi cepat, penyisihan pencemar tinggi dikarenakan konsentrasi radikal bebas pada periode ini juga tinggi sehingga pengaruh tekanan parsial oksigen dalam kinetika reaksi yaitu dengan meningkatkan tekanan parsial oksigen, akan mempersingkat periode induksi, sehingga penyisihan pencemar akan tinggi. Selain mempengaruhi kinetika reaksi, tekanan parsial oksigen juga



mempengaruhi distribusi intermediet. Semakin tinggi tekanan parsial oksigen akan menurunkan jumlah intermediet karena rasio oksigen terhadap pencemar tinggi.

c. pH

Secara umum, kondisi basa kuat dan asam lemah akan mendukung proses degradasi. Pada proses *wet air oxidation*, pH akan menurun apabila terdapat zat intermediet dan pH akan naik apabila zat intermediet terurai. Lin et al. (1994) mempelajari bahwa, pengaruh pH awal terhadap penyisihan COD dalam kondisi suhu 150-300°C. Dalam penelitian tersebut ditemukan bahwa, kemampuan penyisihan COD lebih rendah ketika buffer ditambahkan dibandingkan tanpa buffer.

d. Kecepatan Pengadukan

Reaktor pada sistem *wet air oxidation* dilengkapi dengan pengaduk yang dirancang khusus untuk mengatasi hambatan perpindahan massa. Hambatan perpindahan massa dapat diatasi apabila kecepatan pengadukan tinggi. Secara umum, kecepatan pengadukan yang dibutuhkan untuk mengatasi hambatan antarmuka juga bergantung pada kondisi dan pengaturan reaksi seperti ukuran reaktor, suhu, tekanan oksigen dan konsentrasi substrat. Semakin tinggi suhu dan tekanan oksigen, semakin rendah kecepatan pengadukan yang diperlukan untuk mengatasi hambatan antarmuka

Menurut Patria et al. (2015), *Wet air Oxidation* dibagi menjadi 2 yaitu :

- *Non-catalytic WAO*

*Non-catalytic WAO* adalah proses WAO secara umum atau dengan tidak menggunakan katalis. Beberapa penelitian yang menjelaskan tentang mekanisme WAO kebanyakan menggunakan asam karboksilat atau fenol sebagai senyawa model. Mekanisme WAO diawali dengan terjadinya ekstraksi hidrogen dari gugus  $\alpha$ ,  $\beta\gamma$ -CH<sub>2</sub> asam karboksilat oleh oksigen dan menghasilkan pembentukan radikal bebas yang akan bereaksi dengan oksigen membentuk radikal peroksi. Radikal peroksi dapat menyebabkan terjadinya dekarboksilasi dan pembentuk karbon dioksida dengan abstraksi H dari gugus --COOH molekul asam karboksilat lainnya (Patria et al., 2015).

- *Catalytic WAO*

Kondisi pengoperasian WAO yang ekstrem, memberikan ide untuk menyelidiki manfaat katalis pada WAO yang akan memungkinkan pengurangan suhu, tekanan dan waktu tinggal dalam WAO. Selain itu, dengan menggunakan katalis, dapat oksidasi senyawa yang tahan api seperti asam asetat dan amonia dengan suhu yang jauh lebih rendah dibandingkan tanpa menggunakan katalis. *Catalytic WAO* (CWAO) dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *heterogeneous CWAO* dan *homogeneous CWAO* (Patria et al., 2015).

1. *Heterogeneous CWAO*

*Heterogeneous CWAO* adalah proses CWAO yang menggunakan katalis heterogen. Katalis heterogen memiliki beberapa keunggulan seperti bersifat *high activity*, mudah dalam pemisahan dan tidak menimbulkan pencemaran sekunder (Jing et al., 2016). Selain itu, proses ini mampu mengoksidasi dua senyawa tahan panas seperti asam asetat dan amonia dan air yang diolah dapat langsung dibuang atau digunakan kembali dalam proses (Patria et al., 2015). Katalis heterogen dibagi menjadi tiga kategori yaitu katalis logam non-mulia, katalis logam mulia dan katalis karbon (Jing et al., 2016).

➤ Katalis logam non-mulia

Katalis logam non-mulia terdiri dari satu atau beberapa logam Cu, Mn, Co, Ni, Bi dan logam lainnya. Keuntungan penggunaan logam non-mulia yaitu biayanya murah dan kekurangan penggunaan logam ini yaitu aktivitas katalitiknya relatif rendah dan komponen aktifnya mayoritas menghasilkan lindi sehingga katalis jenis ini perlu ditingkatkan stabilitasnya (Jing et al., 2016).

➤ Katalis logam mulia

Katalis logam mulia terdiri dari satu atau beberapa logam Ru, Rh, Pt, Ir, Au, Ag dan logam lainnya sebagai *carrier*. Meskipun biaya penggunaan logam mulia lebih tinggi, logam mulia memiliki aktivitas katalitik yang lebih baik dibandingkan logam non-mulia. Selain itu, logam mulia juga lebih stabil dalam proses CWAO. Stabilitas logam mulia tergantung pada stabilitas *the carrier* dan *carrier* yang umum dipakai yaitu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Jing et al., 2016).

➤ Katalis Karbon

Karbon *nanotube* (CNT) merupakan bahan karbon satu dimensi yang telah mendapatkan perhatian lebih karena stabilitas kimia dan termalnya yang unik. Gomes et al. (2004), melakukan pengujian terhadap *multi-walled nonotubes* (MWNT), *carbon xerogels* (CX) dan *activated carbon* (AC) yang didukung oleh katalis platinum dalam pengolahan anilin oleh sistem CWAO dan didapatkan hasil bahwa ketiga katalis menunjukkan aktivitas penurunan anilin dan TOC yang sangat tinggi. Selain itu, juga didapatkan hasil yaitu aktivitas katalis dan selektivitas terhadap pembentukan CO<sub>2</sub> bergantung pada sifat dukungan dan konsentrasi oksigen yang mengandung gugus fungsi dan permukaan Katalis karbon memiliki luas permukaan spesifik yang besar, struktur pori, stabilitas yang baik dan sesuai. Katalis karbon merupakan katalis yang menjanjikan namun jenis ini belum diindustrialisasi karena masih banyak kendala dalam penerapannya (Jing et al., 2016).

## 2. *Homogeneous* CWAO

*Homogeneous* CWAO adalah proses CWAO yang menggunakan katalis homogen. Contoh katalis homogen yaitu Cu, Fe, Ni, Co dan Mn. Ketika Cu<sup>2+</sup> digunakan sebagai katalis homogen, biasanya perlu ditambahkan amonia sebagai *stabilizier*. kemudian ditambahkan alkali dan dilakukan pengendapan amonia setelah CWAO selesai dan tersisa tembaga yang mengendap. Endapan tembaga ini digunakan untuk pemulihan resin (Jing et al., 2016). Penggunaan katalis homogen dapat digunakan sebagai alternatif untuk menghilangkan logam tidak larut yang perlu dipisahkan dan didaur ulang ke reaktor atau dibuang (Patria et al., 2015). Katalis homogen memiliki beberapa kelebihan yaitu bersifat *high activity*, selektivitas kuat dan mudah diperoleh, namun katalis homogen juga memiliki kelemahan yaitu susah di pulihkan dan sangat mudah hilang sehingga menyebabkan pencemaran sekunder (Jing et al., 2016).

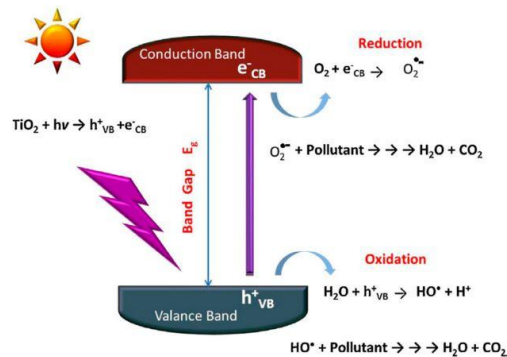
### 2.5.1.6 *Photocatalytic*

Bahan semikonduktor yang terkena paparan sinar uv atau sinar tampak dapat menyediakan permukaan aktif dimana reaksi redoks terjadi dengan memanfaatkan pembentukan elektron dan lubang pada kisi mereka. Prosedur tersebut dinamakan fotokatalis dan dari proses tersebut biasanya menghasilkan hidroksil radikal. Saat bahan semikonduktor

terkena cahaya atau iradiasi UV, energi fotonik yang dipancarkan dari radiasi diserap dari elektron di pita valensi, menciptakan lubang elektron dan mengarah ke eksitasi ke pita konduksi (Pandis et al., 2022). Reaksi yang terjadi pada sistem ini adalah sebagai berikut



Berikut adalah mekanisme fotokatalis yang berupa titanium dioksida terhadap polutan.



**Gambar 2. 2 Mekanisme Photocatalytic**

Sumber: Pandis et al., (2022)

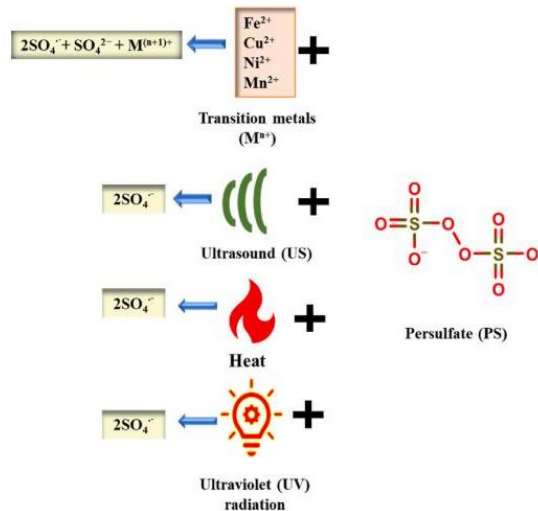
Dalam menurunkan celah pita fotokatalis dibutuhkan energi yang lebih sedikit untuk memulai proses fotooksidasi sehingga energi penyinaran yang diperlukan lebih rendah. Katalis yang banyak digunakan dalam fotokatalis yaitu titanium dioksida karena sifatnya yang stabil, memiliki biaya yang rendah dan tidak toksik. Efisiensi sistem ini dipengaruhi oleh jenis katalis yang digunakan dan kekuatan radiasi. Sistem ini memiliki kelebihan yaitu memiliki biaya operasional yang lebih rendah, merupakan teknik yang paling efisien dan ramah lingkungan serta menghasilkan produk samping dan beban polutan yang lebih rendah (Pandis et al., 2022).

### 2.5.1.7 Sulfate Radicals-Based Advanced Oxidation Processes

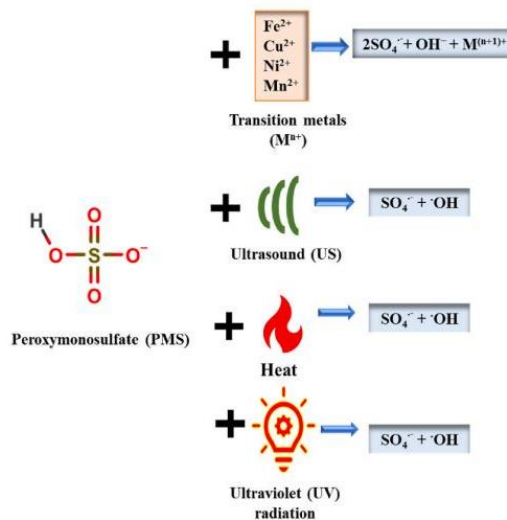
Sulfate Radicals-Based Advanced Oxidation Processes (AOPs) merupakan teknologi yang mulai berkembang di bidang dekontaminasi perairan karena banyak keuntungan menarik yang dimilikinya. SR-AOPs adalah proses dimana *peroxymonosulphate* (PMS) dan *persulphate* (PS) digunakan sebagai prekursor pembentukan radikal sulfat sangat reaktif yang digunakan mendegradasi kontaminan dalam pengolahan limbah. Radikal sulfat memiliki selektivitas yang tinggi dalam bereaksi dengan kontaminan dengan potensi oksidasi sebesar 2,5-3,1 V (Manos et al., 2020; Priyadarshini et al., 2022).

Aktivasi PMS dan PS untuk membentuk radikal sulfat dapat dilakukan dengan beberapa sumber energi seperti dengan logam transisi, katalis karbon, ultrasound, sinar UV, panas, radiasi gamma, konduksi elektron (Manos et al., 2020; Priyadarshini et al., 2022). Dengan sumber energi tersebut, cara yang dilakukan saat menghasilkan radikal sulfat, yaitu dengan pembelahan hemolitik ikatan O-O (4.44 dan 4.45) dan dengan disosiasi air menjadi  $H^{\bullet}$  dan  $\bullet OH$  diikuti dengan reaksi  $H^{\bullet}$  dengan PS dan PMS (4.46-4.48).





**Gambar 2. 3 Metode aktivasi PS beserta Bentuk Radikal Sulfat yang Dihasilkan**  
 Sumber: Priyadarshini et al. (2022)



**Gambar 2. 4 Metode aktivasi PMS beserta Bentuk Radikal Sulfat yang Dihasilkan**  
 Sumber: Priyadarshini et al. (2022)

### 2.5.2 Kelebihan dan Kekurangan Metode *Advanced Oxidation Process*

Kelebihan metode *advanced oxidation process* secara umum, antara lain :

- Laju reaksi cepat untuk sebagian besar bahan kimia (Ameta et al., 2018; Collins & Bolton, 2016; Linden & Mohseni, 2014).
- Dapat mendegradasi senyawa organik tanpa adanya transfer polutan dalam wujud lain yang membutuhkan pengolahan lanjut (Collins & Bolton, 2016; Kumar et al., 2021; Linden & Mohseni, 2014).
- Tidak ada residu padat/ lumpur (Ameta et al., 2018; Linden & Mohseni, 2014).
- Tidak perlu regenerasi untuk menjaga efisiensi proses (Linden & Mohseni, 2014).
- Memiliki potensi untuk mengurangi toksisitas dan sepenuhnya memineralsasi kontaminan organik untuk sebagian besar kontaminan (Ameta et al., 2018; Linden & Mohseni, 2014).

- Bersifat tidak selektif sehingga mampu mendegradasi hampir semua jenis senyawa organik secara bersamaan (Collins & Bolton, 2016; Kumar et al., 2021; Linden & Mohseni, 2014).
- Dapat mengubah senyawa organik *non-biodegradable* menjadi *biodegradable* (Collins & Bolton, 2016).
- Dapat diterapkan dengan skala kecil (Kumar et al., 2021).
- Sangat efektif dalam mengolah hampir semua mikropolutan (Collins & Bolton, 2016).
- Menstimulasi proses desinfeksi mikroba pada saat menguraikan kontaminan (Collins & Bolton, 2016).
- AOPs dapat berperan pada pretreatment untuk mengubah polutan non-biodegradable menjadi polutan biodegradable sehingga dapat diolah secara biologis (Kumar et al., 2021).

Kelemahan metode *advanced oxidation process* secara umum, antara lain :

- Dapat menghasilkan produk transformasi yang tidak diketahui yang dalam beberapa kasus mungkin lebih banyak nefrotoksik daripada senyawa induk tetap yang tidak terurai sehingga air yang sudah diolah harus diuji terlebih dahulu (Collins & Bolton, 2016; Kumar et al., 2021; Linden & Mohseni, 2014).
- Kualitas air limbah mempengaruhi kemampuan efisiensi pengolahan (Linden & Mohseni, 2014).
- Membutuhkan modal yang besar dan biaya operasi dan pemeliharaan yang tinggi seperti penggunaan bahan kimia( beberapa macam katalis) dan kebutuhan listrik (karena konsumsi energi tinggi)(Collins & Bolton, 2016; Kumar et al., 2021; Linden & Mohseni, 2014).
- Perlu menyediakan proses pengolahan selanjutnya untuk menghilangkan sisa oksidan karena beberapa ada yang toxic bagi lingkungan (Kumar et al., 2021; Linden & Mohseni, 2014).
- AOPs terutama sistem fenton dapat berjalan apabila kondisi sistem asam sehingga menghasilkan asam dan basa dalam jumlah besar (Kumar et al., 2021).
- Sistem AOPs yang menggunakan hidrogen peroksida dapat membahayakan manusia sehingga penggunaan hidrogen peroksida harus diperhitungkan dan apabila terdapat residu hidrogen peroksida harus dilakukan pengolahan lanjut untuk menghilangkannya (Kumar et al., 2021; Linden & Mohseni, 2014).
- Merupakan proses yang bergantung kepada dosis yang diberikan untuk mencapai tingkat perlakuan yang diinginkan (Kumar et al., 2021).
- Sebagian besar reaktor UV masih mengandung lampu merkuri sehingga jika terjadi kerusakan memungkinkan terjadinya bahaya merkuri (Collins & Bolton, 2016).
- Gangguan daya dapat menghambat operasi sistem dan berakibat tidak dapat mengolah air keseluruhan apabila tidak terdapat peralatan pengkodisi daya (Collins & Bolton, 2016).

Selain, kelebihan dan kelemahan AOPs secara umum, terdapat juga kelebihan dan kelemahan pada masing masing sistem AOPs. Kelebihan dan kekurangan pada masing masing sistem AOPs dapat dilihat pada tabel 2.6.

**Tabel 2. 6 Kelebihan dan Kekurangan pada Masing Masing Sistem AOPs**

Metode	Kelebihan	Kekurangan
<i>Sonochemical</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak perlu penambahan bahan kimia sehingga disebut teknologi yang ramah lingkungan (Ray et al., 2020).</li> <li>• Terjadi perpindahan panas yang lebih sedikit dibandingkan dengan sistem UV (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Tidak ada pembentukan bromat jika ozon tidak ditambahkan (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Menghasilkan OH yang tinggi (Pandis et al., 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terjadinya polusi suara (Ray et al., 2020).</li> <li>• Memerlukan biaya tinggi seperti untuk keamanan kebisingan dan penambahan oksidan (meningkatkan efisiensi)(Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Kumar et al., 2021; Ray et al., 2020).</li> <li>• Efisiensi mineralisasi rendah (Ray et al., 2020).</li> <li>• Konsumsi energi yang tinggi (Ray et al., 2020).</li> <li>• Tidak ada aplikasi skala penuh (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Penyisihan COD rendah (Kumar et al., 2021).</li> </ul>
Ozon based	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laju reaksi tinggi (produksi OH tinggi akibat pemecahan ozon) (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Produk sampingan yang dihasilkan lebih stabil (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Efektif dalam <i>pretreatment</i> untuk permurnian air (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Pembentukan lumpur rendah (Kumar et al., 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terjadi pembentukan senyawa genotoksik (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Memiliki kelarutan yang rendah di dalam air (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Terjadi <i>self-decomposition</i> (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Biaya instalasi dan operasi yang tinggi, dan diperparah jika volume limbah hariannya juga tinggi (Kumar et al., 2021).</li> <li>• Efisiensi penyisihan COD rendah terutama jika influen limbah mengandung COD yang tinggi (Kumar et al., 2021).</li> </ul>

Metode	Kelebihan	Kekurangan
O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pembentukan radikal hiroksil non-selektif kuat mampu memecah ikat rangkap terkonjugasi (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Ozon dapat digunakan dalam wujud gas sehingga tidak meningkatkan volume air limbah (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Tidak ada pembentukan lumpur (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Merupakan teknologi yang sudah mapan (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Metode yang efisien dalam menghasilkan hidroksil radikal (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Efektif dalam menghilangkan warna, rasa dan bau (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Dapat berfungsi untuk desinfeksi tambahan (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozon dapat menghasilkan produk samping yang beracun (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Memerlukan biaya yang tinggi (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Berpotensi menghasilkan bromat (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Mungkin diperlukan pengolahan lanjut untuk sisa hidrogen peroksida (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Mungkin diperlukan perawatan off-gas ozon (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>
O <sub>3</sub> /UV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lebih efisien dibandingkan hanya menggunakan ozon atau UV saja (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Berfungsi sebagai disinfektan (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berpotensi menghasilkan bromat (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Tidak efisien untuk kekeruhan tinggi karena akan menghalangi radiasi sinar UV dan untuk transmisi air yang rendah (Brienza</li> </ul>

Metode	Kelebihan	Kekurangan
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk konsentrasi yang sama, lebih efisien dalam menghasilkan radikal hidroksil dibandingkan UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Merupakan teknologi yang sudah mapan (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Efektif dalam menghilangkan warna, rasa dan bau (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Senyawa seperti nitrat dapat mengganggu absorbansi sinar UV (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Memerlukan energi dan biaya yang tinggi dalam prosesnya (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Mungkin diperlukan perawatan off-gas ozon (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Perpindahan massa terbatas (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>
<i>Catalytic Ozonation</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perpindahan massa dan konsumsi ozon lebih efektif (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Efektif menghilangkan warna, rasa dan bau (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Dapat berfungsi sebagai desinfeksi tambahan (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Menghasilkan radikal hidroksil yang lebih banyak (Priyadarshini et al., 2022).</li> <li>• Tidak ada batasan pH (Priyadarshini et al., 2022).</li> <li>• Lebih efektif dibandingkan hanya menggunakan ozon (Priyadarshini et al., 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berpotensi menghasilkan bromat (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Tidak ada aplikasi skala penuh yang diketahui (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Berpotensi terjadi kehilangan aktivitas katalis (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Biaya pembelian katalis yang mahal (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Ozon dapat menghasilkan produk samping yang beracun (Priyadarshini et al., 2022).</li> <li>• Terdapat <i>metal ion leaching</i> (Priyadarshini et al., 2022).</li> <li>• Sulit untuk meregenerasi dan menggunakan kembali katalis (Priyadarshini et al., 2022).</li> </ul>



Metode	Kelebihan	Kekurangan
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memisahkan katalis merupakan sebuah tantangan (Priyadarshini et al., 2022).</li> </ul>
UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ( <i>Photolysis</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak ada potensi pembentukan senyawa bromat (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Tersedia sistem pengolahan air minum skala penuh (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Penggunaan UV dapat berfungsi sebagai disinfektan (Linden &amp; Mohseni, 2014; Pandis et al., 2022).</li> <li>• Dapat mengolah air limbah dengan memanfaatkan penyinaran yang rendah (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Biaya rendah (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Merupakan teknologi yang sudah mapan (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Tidak memerlukan pengolahan off-gas dan perpindahan massa tidak terbatas (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak efisien untuk kekeruhan tinggi karena akan menghalangi radiasi sinar UV dan untuk transmisi air yang rendah (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Senyawa seperti nitrat dapat mengganggu absorbansi sinar UV (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Tidak efisien untuk megolah polutan dengan konsentrasi tinggi (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Biaya operasional yang tinggi (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Mungkin diperlukan pengolahan lanjut untuk sisa hidrogen peroksida (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Berpotensi terjadi peningkatan produk sampingan desinfeksi seperti trihalomethanes (THMs) dan haloacetic acids (HAAs) (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>
Fenton based	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondisi operasi sederhana (suhu kamar dan tekanan atmosfer) (Ray et al., 2020).</li> <li>• Tidak menghasilkan produk samping yang beracun seperti bromat (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014; Ray et al., 2020).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terdapat persyaratan untuk penggunaan hidrogen peroksida dalam jumlah besar (Ray et al., 2020).</li> <li>• Kisaran pH untuk operasi terbatas (&lt;2,5) (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014; Ray et al., 2020).</li> </ul>

Metode	Kelebihan	Kekurangan
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu mendegradasi zat warna larut maupun tidak larut dalam limbah industri (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017).</li> <li>• Sangat aktif dalam kondisi pH asam (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Ion Fe memiliki fleksibilitas dalam bereaksi dengan polutan (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Tidak memerlukan pengolahan off-gas (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Dapat dioperasikan dengan mudah (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produk sampingan lumpur yang mengandung logam seperti besi sehingga perlu dilakukan perlakuan lebih lanjut atau dibuang (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014; Pandis et al., 2022; Ray et al., 2020).</li> <li>• Membutuhkan biaya tinggi seperti untuk preparasi reagen fenton, penyesuaian pH, pembuangan lumpur (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014; Pandis et al., 2022; Ray et al., 2020).</li> <li>• Laju reaksi lambat (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Terjadinya pembentukan klorat dalam larutan basa (Pandis et al., 2022).</li> </ul>
Fotofenton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terdapat proses regenerasi <math>Fe^{2+}</math> secara insitu (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Tidak terjadi pembentukan bromat (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Tidak memerlukan pengolahan off-gas (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak ada aplikasi dengan skala penuh (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Memerlukan kondisi pH yang rendah atau asam (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Membutuhkan biaya operasi yang tinggi seperti untuk penyesuaian pH, dan perawatan lampu UV (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>
Elektrofenton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produksi hidrogen peroksida secara insitu sehingga menghindari resiko yang terkait pengangkutan, penyimpanan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memerlukan kondisi pH yang rendah atau asam (Procházka et al., 2019)</li> </ul>

Metode	Kelebihan	Kekurangan
	<p>dan penangannya (Nidheesh &amp; Gandhimathi, 2012; Oturan &amp; Oturan, 2018; Paramo-Vargas et al., 2015)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengkatalis reaksi fenton dengan regenerasi Fe<sup>2+</sup> secara terus menerus sehingga Tingkat penghilangan polutan lebih tinggi terjadi (Oturan &amp; Oturan, 2018; Paramo-Vargas et al., 2015).</li> <li>• Mengurangi penggunaan bahan kimia karena terjadi regenerasi pada bahan kimia yang dipakai (Oturan &amp; Oturan, 2018).</li> <li>• Tidak ada pembentukan lumpur (Nidheesh &amp; Gandhimathi, 2012; Oturan &amp; Oturan, 2018; Paramo-Vargas et al., 2015).</li> <li>• Dapat berpotensi untuk mencapai mineralisasi keseluruhan dengan biaya yang relatif rendah (Oturan &amp; Oturan, 2018).</li> <li>• Karena proses fenton tidak menggunakan reagen yang berbahaya maka metode ini merupakan metode yang ramah lingkungan (Nidheesh &amp; Gandhimathi, 2012).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membutuhkan biaya operasi yang tinggi seperti untuk penyesuaian pH (Fernández de Dios et al., 2014; Linden &amp; Mohseni, 2014)</li> </ul>
<i>Wet Air Oxidation</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sebagian besar kontaminan tetap berada dalam fase cair (Kolaczowski et al., 1999).</li> <li>• Biaya operasi yang murah (Kolaczowski et al., 1999).</li> <li>• Sedikit menghasilkan polusi udara (Kolaczowski et al., 1999).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terkadang mineralisasi lengkap terhadap zat organik tidak tercapai karena terdapat akumulasi senyawa teroksidasi dengan berat molekul rendah yang menahan proses transformasi dari zat antara menjadi karbon dioksida (Ray et al., 2020).</li> </ul>

Metode	Kelebihan	Kekurangan
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biaya modal yang tinggi (Kolaczowski et al., 1999).</li> <li>• Implikasi keselamatan terkait dengan sistem yang beroperasi buruk (Kolaczowski et al., 1999).</li> </ul>
<i>Photocatalytic</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak terjadi pembentukan bromat yang bersifat karsinogenik sehingga tidak beracun (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014; Pandis et al., 2022).</li> <li>• Katalis dapat didaur ulang (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017)</li> <li>• Stabil dan membutuhkan biaya rendah (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Efektif dalam mendegradasi polutan dalam air oleh permukaan katalis (Pandis et al., 2022)</li> <li>• Ramah lingkungan/ beban polutan rendah (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Dapat memanfaatkan penyinaran dengan panjang gelombang yang lebih tinggi (300-400 nm) (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Bebas bahan kimia (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Tidak ada off-gas atau bahan kimia sisa pengolahan (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak ada pengaplikasian dengan skala penuh (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Jika katalis yang ditambahkan berbentuk <i>slurry</i>, maka pemisahan perlu dilakukan (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Konsentrasi katalis yang optimal memerlukan studi yang teliti (Brienza &amp; Katsoyiannis, 2017; Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Pemilihan katalis yang tidak tepat (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Panjang gelombang radiasi membutuhkan biaya operasional yang tinggi (Pandis et al., 2022).</li> <li>• Berpotensi terjadi kehilangan aktivitas katalis (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Hasil kuantum rendah (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> <li>• Terkadang memerlukan ozon sparging (Linden &amp; Mohseni, 2014).</li> </ul>
SR-AOPs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radikal sulfat memiliki waktu paruh tiga kali lipat lebih panjang dari radikal hidroksil (Priyadarshini et al., 2022)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terjadi peningkatan kadar garam dan terdapat ion sulfat pada akhir produk (Priyadarshini et al., 2022)</li> </ul>

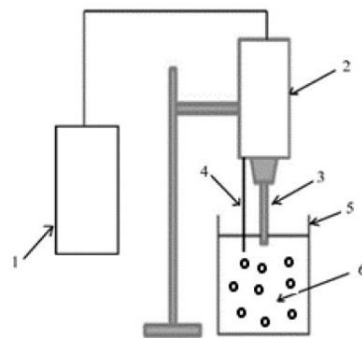
Metode	Kelebihan	Kekurangan
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memiliki potensi oksidasi yang lebih tinggi dibandingkan radikal hidroksil (Priyadarshini et al., 2022)</li> <li>• Radikal sulfat bekerja pada rentang pH yang luas (2-8) (Priyadarshini et al., 2022)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membutuhkan energi yang besar dalam bentuk panas, sinar UV atau AS untuk aktivasi PMS dan PS (Priyadarshini et al., 2022)</li> </ul>

### 2.5.3 Komponen yang digunakan pada Masing- Masing Sistem *Advanced Oxidation Process*

Komponen yang digunakan pada sistem AOPs berbeda-beda tergantung pada jenis sistem yang digunakan. Komponen pada masing masing sistem, antara lain:

#### a. *Sonochemical*

Sistem *sonochemical* menghasilkan radikal bebas dengan menggunakan gelombang ultrasonik sehingga komponen paling utama yang digunakan yaitu alat untuk menghasilkan gelombang ultrasonik. Lalu, untuk komponen lain berfungsi sebagai pendukung berjalannya suatu sistem. Skema sistem *sonochemical* skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.5.



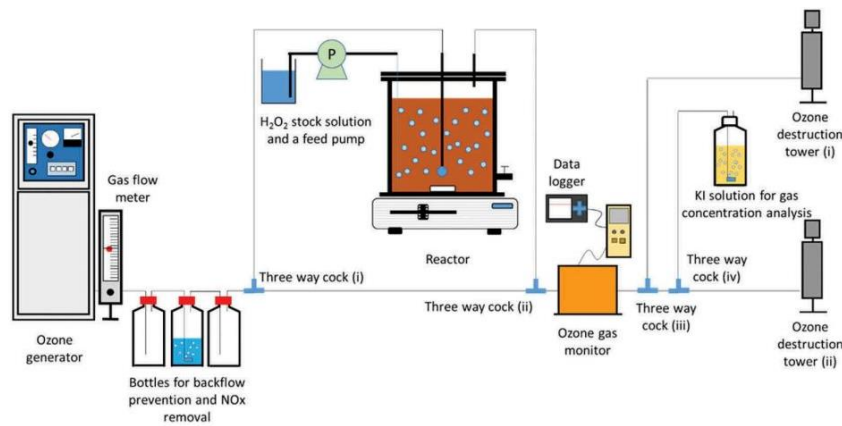
**Gambar 2. 5 Skema Sistem Sonochemical Skala Penelitian. (1) AC Generator (2) Ultrasonic Transducer (3) Sonotrode (4) Pt100 Thermometer (5) Beaker (6) Larutan**

*Sumber: Cobianu et al. (2020)*

Komponen sistem *sonochemical* pada gambar 2.5 terdiri dari *AC generator, ultrasonic transducer, sonotrode, pt100 thermometer, beaker* dan larutan. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu daya listrik yang dihasilkan oleh AC generator diubah menjadi daya akustik oleh ultrasonic converter. Lalu daya akustik tersebut memberikan densitas daya untuk sonotrode yang direndam larutan sehingga energi akustik berpindah ke larutan dan menciptakan gelombang akustik. Kemudian terjadilah reaksi kavitasi akustik yang menghasilkan radikal bebas. Radikal bebas tersebut yang berfungsi untuk mengurai kontaminan (Cobianu et al., 2020).

#### b. $O_3/H_2O_2$

Sistem  $O_3/H_2O_2$  menghasilkan radikal bebas dengan mengkombinasikan  $O_3$  dengan  $H_2O_2$  sehingga komponen paling utama yang digunakan yaitu ozon generator dan  $H_2O_2$ . Namun, pada sistem tersebut, juga terdapat komponen lain yang berfungsi sebagai pelengkap berjalannya sistem tersebut. Skema sistem  $O_3/H_2O_2$  skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.6.



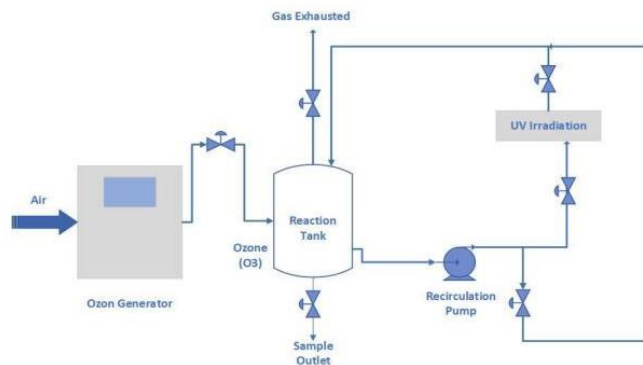
**Gambar 2. 6 Skema Sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Skala Penelitian**

*Sumber: Mizuno et al., (2018)*

Komponen sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pada gambar 2.6 terdiri dari ozon generator, *gas flow meter*, *bottles*, *H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> stock solution*, *feed pump*, reaktor, *ozone gas monitor*, *KI solution* dan *ozone destruction tower*. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu air limbah yang akan diolah dimasukkan ke dalam reaktor lalu dinyalakan alat pengaduk. Selanjutnya, gas ozon yang berasal dari ozon generator dialirkan ke reaktor secara terus menerus serta larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dipompa menuju reaktor dengan jumlah tertentu. Pada proses tersebut, dihasilkan radikal bebas yang akan berfungsi untuk menguraikan kontaminan. Lalu, ozon yang tersisa setelah reaksi dihilangkan menggunakan *ozone destruction tower*. Selama proses tersebut terjadi, pemberian ozon dikontrol melalui *ozone gas monitor* dan penambahan botol berfungsi untuk mencegah terjadinya *backflow*. Larutan KI tidak terlalu berpengaruh pada sistem karena larutan KI dipakai apabila memiliki keperluan untuk menganalisis konsentrasi gas (Mizuno et al., 2018).

c. O<sub>3</sub>/UV

Sistem O<sub>3</sub>/UV menghasilkan radikal bebas dengan mengombinasikan O<sub>3</sub> dengan sinar UV sehingga komponen utama yang dibutuhkan yaitu ozon generator dan lampu UV. Selain itu, terdapat komponen lain sebagai pelengkap berjalannya sistem tersebut. Skema sistem O<sub>3</sub>/UV skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.7.



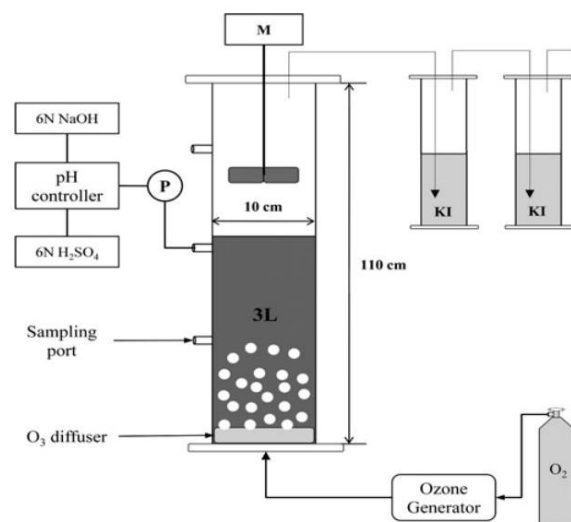
**Gambar 2. 7 Skema Sistem O<sub>3</sub>/UV Skala Penelitian**

*Sumber: AR et al. (2019)*

Komponen sistem  $O_3/UV$  pada gambar 2.7 terdiri dari ozon generator, tangki reaksi, pompa resirkulasi dan lampu UV. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu limbah dimasukkan ke dalam tangki reaksi kemudian ozon yang dihasilkan oleh ozon generator dipompa ke tangki tersebut. Kemudian, penyinaran UV dilakukan secara resirkulasi dengan menggunakan pompa resirkulasi agar larutan terus menerus terpapar oleh penyinaran UV sehingga menghasilkan radikal bebas yang akan mengurai kontaminan (AR et al., 2019).

d. *Catalytic Ozonation*

Sistem *catalytic ozonation* menghasilkan radikal bebas dengan mengkombinasikan ozon dengan katalis sehingga komponen paling utama yang digunakan yaitu penghasil ozon atau ozon generator dan katalis. Selain itu, terdapat komponen lain yang berfungsi sebagai pendukung jalannya suatu sistem. Skema sistem *catalytic ozonation* skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.8.



**Gambar 2. 8 Skema Sistem Catalytic Ozonation Skala Penelitian**  
*Sumber : Lee et al. (2010)*

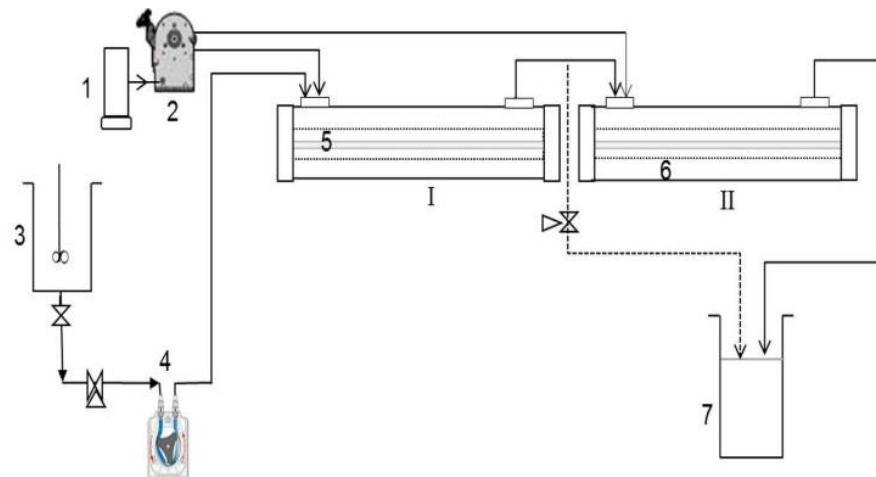
Komponen sistem *catalytic ozonation* pada gambar 2.8 terdiri dari *ozon generator*, tabung oksigen 95% murni, reaktor silinder, *ozon diffuser*, larutan katalis, *pH controller* dan pengaduk. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu oksigen 95% murni yang terdapat pada tabung dialirkan menuju ozon generator sehingga dihasilkan ozon. Ozon ditambahkan ke reaktor silinder melalui ozon diffuser. Lalu, katalis yang ada direaksikan dengan ozon di dalam silinder reaktor. Pada reaksi tersebut radikal bebas yang akan mengurai kontaminan dihasilkan. Perlu diketahui bahwa *catalytic ozonation* sangat dipengaruhi oleh pH sehingga membutuhkan *pH controller* untuk mengontrol pH agar operasi tetap berjalan optimum (Lee et al., 2010).

e. *UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Photolysis)*

Sistem *UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Photolysis)* menghasilkan radikal bebas dengan mereaksikan sinar UV dengan senyawa  $H_2O_2$  sehingga komponen utama yang digunakan yaitu



lampu UV dan senyawa  $H_2O_2$ . Kemudian, pada sistem ini juga terdapat komponen lain yang berfungsi sebagai pelengkap berjalannya suatu sistem. Skema sistem UV/  $H_2O_2$  (*Photolysis*) skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.9.

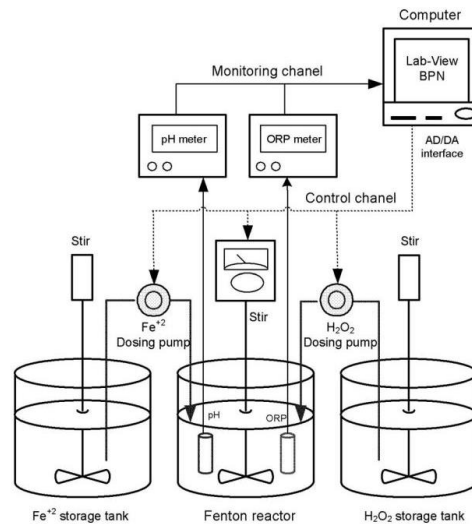


**Gambar 2. 9 Skema Sistem UV/  $H_2O_2$  (*Photolysis*) Skala Penelitian. (I) dan (II) Photoreactors (1)  $H_2O_2$  Storage (2) Multichannel Peristaltic Pumps (3) Feed tank (4) Feed Peristaltic Pumps (5) UV Lamp (6) Reaction Zone (7) Effluent Tank**  
*Sumber: Hamad et al. (2016)*

Komponen sistem UV/  $H_2O_2$  (*Photolysis*) pada gambar 2.9 terdiri dari *photoreactors*, *H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> storage*, *multichannel peristaltic pumps*, *feed tank*, *feed peristaltic pumps*, lampu UV, zona reaksi dan *effluent tank*. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu berawal dari air limbah dipompa dari *feed tank* menuju *reaction zone*. Pompa yang digunakan pada proses tersebut yaitu *feed peristaltic pump*. Pada *reaction zone*, terdapat lampu UV yang akan meradiasi air limbah. Selain itu, terjadi penambahan  $H_2O_2$  yang berasal dari *H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> storage* dengan cara dipompa menggunakan *multichannel peristaltic pump* menuju *reaction zone*. Reaksi antara air limbah,  $H_2O_2$  dengan diradiasi sinar UV menghasilkan radikal bebas yang akan menguraikan kontaminan (Hamad et al., 2016).

f. Fenton

Sistem fenton menghasilkan radikal bebas dengan mereaksikan ion  $Fe^{2+}$  dengan  $H_2O_2$  sehingga komponen utama yang digunakan yaitu bahan kimia berupa  $Fe_2SO_4$  (yang akan menghasilkan ion  $Fe^{2+}$ ) dan  $H_2O_2$ . Selain itu, terdapat komponen lain yang berfungsi sebagai pendukung jalannya suatu sistem. Skema sistem fenton skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.10.

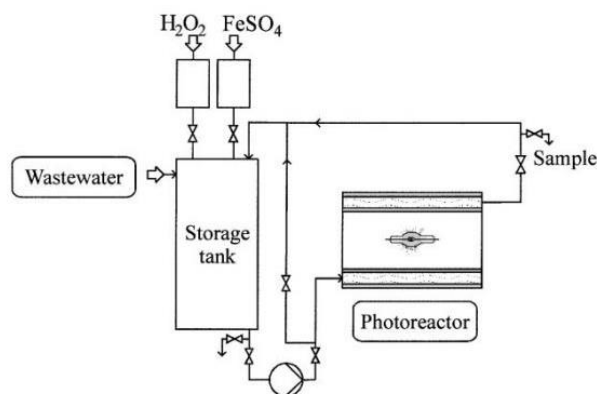


**Gambar 2. 10 Skema Sistem Fenton Skala Penelitian**  
*Sumber : Yu et al. (2009)*

Komponen sistem fenton pada gambar 2.10 terdiri dari  $\text{Fe}^{2+}$  storage tank,  $\text{H}_2\text{O}_2$  storage tank, reaktor fenton, pengaduk mekanik, dosing pump, pH meter, ORP meter dan komputer. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu sampel air limbah dituang ke dalam reaktor sembari dinyalakan pengaduk mekanik yang berada pada reaktor dan storage tank. Lalu, diatur pH terlebih dahulu agar reaksi berjalan optimal. Setelah itu  $\text{Fe}^{2+}$  dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  ditambahkan ke reaktor melalui dosing pump. Pada saat tersebut, radikal bebas dihasilkan dan bereaksi dengan kontaminan sehingga kontaminan terurai (Yu et al., 2009).

g. Fotofenton

Sistem fotofenton menghasilkan radikal bebas dengan mereaksikan sistem fenton dengan sinar UV sehingga komponen utama yang digunakan yaitu komponen utama pada sistem fenton dan lampu UV. Selain itu, terdapat komponen lain yang melengkapi berjalannya sistem tersebut. Skema sistem fotofenton skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.11.

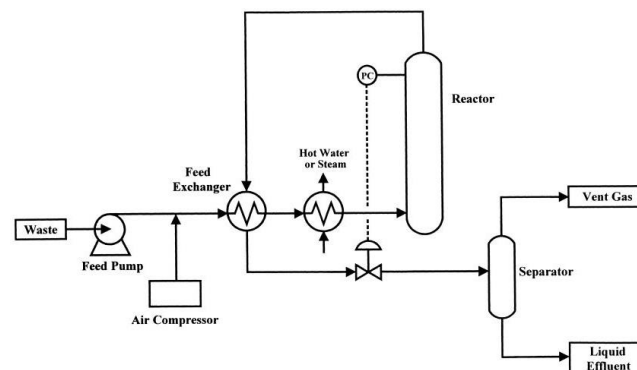


**Gambar 2. 11 Skema Sistem Fotofenton Skala Penelitian**  
*Sumber: Bauer et al., (1999)*

Komponen sistem fotofenton pada gambar 2.11 terdiri dari *storage tank*, *photoreactor*, larutan  $H_2O_2$  dan larutan  $FeSO_4$ . Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu berawal dari air limbah yang dialirkan menuju *storage tank*. Kemudian, ditambahkan larutan  $H_2O_2$  dan larutan  $FeSO_4$  sehingga terjadi reaksi fenton yang menghasilkan radikal hidroksil, lalu air limbah dialirkan menuju *photoreactor* untuk disinari dengan sinar UV sehingga membentuk radikal hidroksil lebih banyak lagi. Radikal hidroksil tersebut akan menguraikan kontaminan yang ada pada air limbah (Bauer et al., 1999).

h. *Wet Air Oxidation (WAO)*

Sistem WAO menghasilkan radikal bebas dengan memanfaatkan oksigen atau udara sebagai oksidator zat organik maupun anorganik pada kondisi ekstrem yaitu saat suhu dan tekanan yang tinggi. Maka dari itu, komponen utama yang digunakan yaitu oksigen serta alat yang dapat membuat kondisi dimana temperatur dan tekanan tinggi. Lalu, terdapat juga komponen lain yang berfungsi sebagai pendukung jalannya suatu sistem. Skema sistem WAO skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.12.



**Gambar 2. 12 Skema Sistem WAO Skala Penelitian**

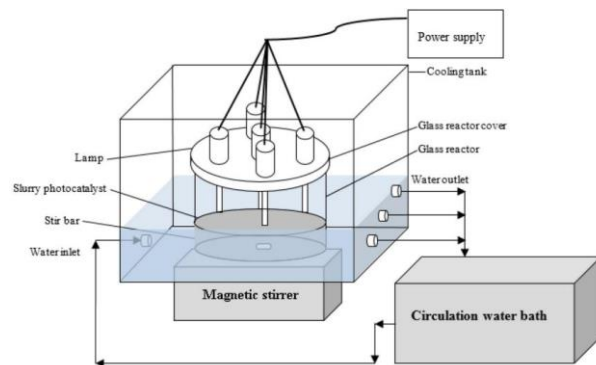
*Sumber : Kolaczowski et al. (1999)*

Komponen sistem WAO pada gambar 2.12 terdiri dari *feed pump*, *air compressor*, *feed exchanger*, air panas atau aliran panas, *control valve*, reaktor dan *separator*. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu pada saat air limbah dipompa menuju *feed exchanger*, oksigen bertekanan yang berasal dari *air compressor* diinjeksikan ke dalam air limbah agar meningkatkan tekanan dan perpindahan panas. Lalu, air limbah dipanaskan pada *heat exchanger* dengan menggunakan air panas hingga suhu tertentu. Kemudian, reaksi AOPs terjadi di dalam reaktor dan menghasilkan radikal bebas yang akan mengurai kontaminan pada limbah. Lalu, effluen yang masih panas didinginkan di dalam *feed exchanger* dan tekanan diturunkan pada *control valve*. Kemudian, aliran limbah dipisahkan oleh *separator* menjadi fase uap dan cair sebelum diproses lebih lanjut (Kolaczowski et al., 1999).

i. *Photocatalytic*

Sistem *photocatalytic* menghasilkan radikal bebas dengan mengombinasikan sinar UV dengan katalis sehingga komponen paling utama yang digunakan yaitu lampu

UV dan katalis. Lalu, terdapat komponen lain yang berfungsi sebagai pendukung berjalannya sistem tersebut. Skema sistem *photocatalytic* skala penelitian dapat dilihat pada gambar 2.13.



**Gambar 2. 13 Skema Sistem Photocatalytic Skala Penelitian**

Sumber: Nasirian & Mehrvar (2018)

Komponen sistem *photocatalytic* pada gambar 2.13 terdiri dari lampu UV, *slurry photocatalyst*, *stir bar*, *glass reactor*, *glass reactor cover*, *cooling tank*, *magnetic stirrer* dan *power supply*. Mekanisme yang terjadi pada skema tersebut yaitu air yang akan diolah masuk pada inlet lalu menuju reaktor. Reaktor tersebut terdiri dari *glass reactor* dan *glass reactor cover* yang terdapat lampu UV yang dipasang secara vertikal di dalamnya. Lalu, air yang berada di reaktor, ditambahkan katalis yang berwujud *slurry* dan diradiasi dengan sinar UV serta diaduk terus menerus menggunakan *magnetic stirrer*. Pada saat tersebut, terbentuk radikal bebas yang berfungsi untuk menguraikan kontaminan. Suhu larutan selama reaksi harus selalu diperhatikan sehingga perlu adanya *cooling tank* untuk mensirkulasikan kembali larutan (Nasirian & Mehrvar, 2018).

Rangkuman komponen yang digunakan pada pada masing-masing sistem AOPs dapat dilihat pada Tabel 2.7.

**Tabel 2. 7 Komponen yang digunakan tiap sistem AOPs**

No	Sistem AOPs	Komponen	Sumber
1	<i>Sonochemical</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>AC generator</i></li> <li>• <i>Ultrasonic transducer</i></li> <li>• <i>Sonotrode</i></li> <li>• <i>Pt100 thermometer</i></li> <li>• <i>Beaker</i></li> <li>• Larutan</li> </ul>	Cobianu et al., (2020)
2	$O_3/H_2O_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozon generator</li> <li>• <i>Gas flow meter</i></li> <li>• Botol</li> <li>• <i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> stock solution</i></li> <li>• <i>Feed pump</i></li> </ul>	Mizuno et al., (2018)

No	Sistem AOPs	Komponen	Sumber
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktor</li> <li>• <i>Ozone gas monitor</i></li> <li>• <i>KI solution</i></li> <li>• <i>zone destruction tower</i></li> </ul>	
3	O <sub>3</sub> /UV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozon generator</li> <li>• Tangki reaksi</li> <li>• Pompa resirkulasi</li> <li>• Lampu UV.</li> </ul>	AR et al., (2019)
4	<i>Catalytic Ozonation</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Ozon generator</i></li> <li>• Tabung oksigen 95% murni</li> <li>• Reaktor silinder (Lee et al., 2010).</li> <li>• <i>Ozon Diffuser</i></li> <li>• Larutan katalis</li> <li>• pH controller</li> <li>• Pengaduk</li> </ul>	Lee et al., (2010)
5	UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ( <i>Photolysis</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Photoreactors</i></li> <li>• <i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> storage</i></li> <li>• <i>Multichannel peristaltic pumps</i></li> <li>• <i>Feed tank</i></li> <li>• <i>Feed peristaltic pumps</i></li> <li>• Lampu UV</li> <li>• Zona reaksi</li> <li>• <i>Effluent tank.</i></li> </ul>	Hamad et al., (2016)
6	Fenton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fe<sup>2+</sup> <i>storage tank</i></li> <li>• H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> <i>storage tank</i></li> <li>• Reaktor fenton</li> <li>• Pengaduk mekanik</li> <li>• <i>Dosing pump</i></li> <li>• pH meter</li> <li>• ORP meter</li> <li>• Komputer</li> </ul>	Yu et al., (2009)
7	Fotofenton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Storage tank</i></li> <li>• <i>Photoreactor</i></li> <li>• Larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></li> <li>• Larutan FeSO<sub>4</sub>.</li> </ul>	Bauer et al., (1999)
8	<i>Wet Air Oxidation</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Feed pump</i></li> <li>• <i>Air compressor</i></li> </ul>	Kolaczowski et al., (1999)

No	Sistem AOPs	Komponen	Sumber
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Feed exchanger</i></li> <li>• Air atau aliran panas</li> <li>• <i>Control valve</i></li> <li>• Reaktor</li> <li>• <i>Separator</i></li> </ul>	
9	<i>Photocatalytic</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lampu UV</li> <li>• <i>Slurry photocatalyst</i></li> <li>• <i>Stir bar</i></li> <li>• <i>Glass reactor</i></li> <li>• <i>Glass reactor cover</i></li> <li>• <i>Cooling tank</i></li> <li>• <i>Magnetic stirrer</i></li> <li>• <i>Power supply</i></li> </ul>	Nasirian & Mehrvar, (2018)

## 2.6 Limbah yang dapat Diolah dengan Metode *Advanced Oxidation Processes*

Metode *Advanced Oxidation Process* merupakan metode yang sesuai untuk mengolah air limbah yang mengandung bahan kimia (polutan) berbahaya dan mengandung senyawa organik terutama senyawa organik *non-biodegradable* dikarenakan senyawa ini sulit terurai dengan pengolahan biologis biasa. Metode AOPs merupakan pengolahan yang memiliki reaktivitas yang tinggi dan selektivitas oksidasi yang rendah sehingga mampu mengubah polutan berbahaya menjadi zat yang tidak berbahaya dan mengubah senyawa organik *non-biodegradable* menjadi senyawa organik *biodegradable* dalam waktu yang singkat. Senyawa organik *non-biodegradable* yang dapat diuraikan, antara lain: pestisida, surfaktan, zat pewarna, obat-obatan dan senyawa fenolik yang terdapat pada air limbah industri seperti industri kimia, petrokimia, tekstil, pulp dan kertas dan lain lain serta air limbah perkotaan (Covinich et al., 2014; Ghime & Ghosh, 2020; Krishnan et al., 2017; Stasinakis, 2008).

Beberapa senyawa organik yang dapat diurai oleh AOPs yaitu cincin aromatik, polifenol, senyawa terhalogenasi, asam resin, asam lemak tak jenuh, senyawa yang dihasilkan dari proses dekomposisi nitrogen dan senyawa mutagenik (TNT). Selain itu, AOPs juga dapat menguraikan kontaminan organik terlarut seperti hidrokarbon terhalogenasi (trikloroetan dan triloretilen), senyawa aromatik (benzena, toluena, etilbenzena dan xilena BTCE), senyawa organik volatil (VOC), pentraklorofenol (PCP), nitrofenol, sianida, sulfida dan nitrit (Covinich et al., 2014).

## 2.7 Posisi Metode *Advanced Oxidation Processes* dalam Pengolahan Limbah

Metode *Advanced Oxidation Processes* dalam Pengolahan Limbah dapat juga diterapkan sebagai pre-treatment dan tertiary treatment/post treatment.

### 2.7.1 Pre-treatment

Metode *Advanced Oxidation Processes* sebagai pre-treatment dalam pengolahan limbah berfungsi untuk meningkatkan biodegradabilitas limbah, memecah molekul besar atau

memutuskan rantai molekul persisten pada limbah, mengurangi toksisitas air limbah yang akan menghambat proses pengolahan biologis dan untuk mengeliminasi beberapa senyawa yang terkandung sehingga memudahkan pengolahan biologis dalam mengolah limbah tersebut. Penggunaan metode AOPs sebagai pre-treatment ini juga bertujuan untuk mencapai biaya yang lebih rendah dalam penggunaannya namun polutan yang sulit terurai dapat teruraikan dengan baik (Almaguer et al., 2021; Covinich et al., 2014; Krishnan et al., 2017; Stasinakis, 2008)

### **2.7.2 Tertiary Treatment**

Jika pada pre-treatment, metode *Advanced Oxidation Processes* berfungsi untuk membantu memudahkan pengolahan biologis, sedangkan pada *tertiary treatment*, metode *Advanced Oxidation Processes* berfungsi untuk menghilangkan kontaminan yang tidak terdegradasi sepenuhnya pada pengolahan biologis sehingga kontaminan tersebut tidak akan sampai ke lingkungan. Kontaminan tersebut dapat berupa senyawa organik *non-biodegradable* seperti warna, dll. Selain itu, metode AOPs sebagai *tertiary treatment* dapat berfungsi untuk mendetoksifikasi limbah yang mengandung kontaminan berbahaya (Bermúdez et al., 2021; Cesaro et al., 2013; Garrido-Cardenas et al., 2019; Sevimli, 2005). Penggunaan metode AOPs sebagai *tertiary treatment* juga memiliki tujuan yang sama seperti halnya pada pre-treatment yaitu mengoptimalkan seluruh biaya proses namun polutan yang ada terurai dengan baik (Bermúdez et al., 2021).

### **2.8 Aplikasi Metode *Advanced Oxidation Processes* dalam Pengolahan Limbah**

Metode *Advanced Oxidation Processes* dapat diaplikasikan ke berbagai jenis seperti udara (sebagai penghilang bau dan pemurnian), tanah (sebagai peremediasi) dan dekontaminasi air (Mazille & Spuhler, 2013). Aplikasi penggunaan metode *Advanced Oxidation Processes* dalam pengolahan limbah dapat dilihat pada Tabel 2.8.

**Tabel 2. 8 Aplikasi Metode Advanced Oxidation Processes dalam Pengolahan Limbah**

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
Lindi	-	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	Laboratorium	pH = 6 ; TiO <sub>2</sub> = 1 g/L	Efisiensi penyisihan BOD berdasarkan variasi Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 mL/L = 42%</li> <li>▪ 14 mL/L = 39 %</li> </ul> Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 mL/L = 22 %</li> <li>▪ 14 mL/L = 30 %</li> </ul>	Yuningrat et al., (2012)
	DHL = 2470-3000 µmhos, kekeruhan = 80-90 NTU, suhu 25-29 °C dan pH = 8,6-8,7	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Laboratorium	Waktu kontak = 180 menit	Nilai pH berdasarkan variasi debit udara: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2L/ menit =9,3</li> <li>▪ 3L/menit = 9,25</li> <li>▪ 4L/menit = 9,2</li> </ul> Efisiensi Kekeruhan berdasarkan variasi debit udara: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2L/ menit =22,49%</li> <li>▪ 3L/menit = 35,67%</li> <li>▪ 4L/menit = 45,15%</li> </ul> Efisiensi DHL berdasarkan variasi debit udara: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2L/ menit =10%</li> <li>▪ 3L/menit = 14,33%</li> <li>▪ 4L/menit = 15%</li> </ul>	Fadiyah et al., (2017)
	-	Fotofenton	Laboratorium	Panjang gelombang = 254 nm; Waktu reaksi = 120 menit; pH =3; Debit	Penyisihan TSS berdasarkan perbandingan H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :FeSO <sub>4</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 70%</li> <li>▪ 10:0,15 = 81,9%</li> <li>▪ 10:0,2 = 82,4 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 84,5%</li> <li>▪ 10:0,3 = 91%</li> </ul>	Lesa et al., (2020)



Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				aliran = 0,6 L/s	<p>Penyisihan COD berdasarkan perbandingan <math>H_2O_2:FeSO_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 35%</li> <li>▪ 10:0,15 = 63%</li> <li>▪ 10:0,2 = 64 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 65%</li> <li>▪ 10:0,3 = 87%</li> </ul> <p>Penyisihan BOD berdasarkan perbandingan <math>H_2O_2:FeSO_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 38%</li> <li>▪ 10:0,15 = 39%</li> <li>▪ 10:0,2 = 45%</li> <li>▪ 10:0,25 = 59%</li> <li>▪ 10:0,3 = 70%</li> </ul> <p>Penyisihan <math>PO_4</math> berdasarkan perbandingan <math>H_2O_2:FeSO_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 30%</li> <li>▪ 10:0,15 = 43%</li> <li>▪ 10:0,2 = 52 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 59 %</li> <li>▪ 10:0,3 = 65%</li> </ul> <p>Penyisihan Total N berdasarkan perbandingan <math>H_2O_2:FeSO_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 49%</li> <li>▪ 10:0,15 = 55%</li> <li>▪ 10:0,2 = 68 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 70 %</li> <li>▪ 10:0,3 = 79%</li> </ul>	

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
Industri Penyamakan Kulit	COD = 250,9 mg/L	Fenton	Laboratorium	Kondisi optimum: pH = 4; Konsentrasi FeSO <sub>4</sub> = 0,2% ; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> sebesar 120 ppm	Efisiensi penyisihan COD = 34%	Sholeh et al., (2013)
Industri Pulp dan Kertas	Kekeruhan = 256 NTU, BOD = 140 mg/L, COD = 1322 mg/L, TOC = 749 mg/L, Lignin 77 mg/L, AOX = < 0,01 ppm dan pH = 7,86	O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Laboratorium	Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 17 %</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 23%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =27,9 %</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 69 %</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 72%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik = 80%</li> </ul>	Ristiawan & Syafila, (2015)
				Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 1000 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 14,9 %</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 28,1%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =24,5 %</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 73,4%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 88 %</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =82,1%</li> </ul>	

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 1500 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 8,5%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 22,5%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =17,5%</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 72,1%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 88%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =81,2%</li> </ul>	
				Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 2000 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 13,5%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 12,5%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =4,6%</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 68,5%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 87%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =75%</li> </ul>	
	-	<i>Peroxymonosulfate/ Katalis nitrogen-doped three-dimensional carbon framework (3D NCF).</i>	Laboratorium	PMS = 2 g/L ; Suhu = 30° C ; Waktu reaksi = 120 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi konsentrasi katalis: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 g/L = 20,68%</li> <li>▪ 0,1 g/L = 76,44%</li> <li>▪ 0,2 g/L = 86,04%</li> <li>▪ 0,3 g/L = 87,35%</li> <li>▪ 0,4 g/L = 88,22%</li> </ul>	Apriliani et al., (2019)

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
Industri Batik	Warna = 15.000 Pt-Co, pH = 8 dan Fenol = 0,099 mg/L	O <sub>3</sub> /GAC	Laboratorium	Waktu Kontak = 15 menit ; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 98,75%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,53%</li> <li>▪ 1 gr = 99,63%</li> <li>▪ 2 gr = 99,83%</li> </ul> Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 94,75%</li> <li>▪ 0,5 gr = 97,02%</li> <li>▪ 1 gr = 97,52%</li> <li>▪ 2 gr = 97,72%</li> </ul>	Ayuningtyas, (2020)
				Waktu Kontak = 30 menit; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,16%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,69 %</li> <li>▪ 1 gr = 99,72%</li> <li>▪ 2 gr = 99,83%</li> </ul> Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 97,88%</li> <li>▪ 0,5 gr = 98,28%</li> <li>▪ 1 gr = 98,64%</li> <li>▪ 2 gr = 98,74%</li> </ul>	
				Waktu Kontak = 60 menit; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,6%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,86%</li> <li>▪ 1 gr = 99,73%</li> <li>▪ 2 gr = 99,9%</li> </ul>	

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
					<p>Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 98,99%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,19%</li> <li>▪ 1 gr = 99,44%</li> <li>▪ 2 gr = 99,8%</li> </ul>	
				<p>Waktu Kontak = 90 menit; pH = 8</p>	<p>Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,5%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,6%</li> <li>▪ 1 gr = 99,8%</li> <li>▪ 2 gr = 99,9%</li> </ul> <p>Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,09 %</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,39%</li> <li>▪ 1 gr = 99,65%</li> <li>▪ 2 gr = 99,8%</li> </ul>	
	-	UV/Fenton/ TiO <sub>2</sub>	Laboratorium	<p>Waktu kontak = 120 menit; pH = 5; Lampu UV = 30 watt; Kadar TiO<sub>2</sub> = 2,5 gram</p>	<p>Efisiensi Penyisihan COD berdasarkan perbandingan rasio molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1= 68,5%</li> <li>▪ 10:0,15= 72,4%</li> <li>▪ 10:0,2= 73%</li> <li>▪ 10:0,25= 83,3%</li> <li>▪ 10:0,3= 69,3%</li> </ul> <p>Efisiensi Penyisihan TSS berdasarkan perbandingan rasio molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1= 73,4%</li> <li>▪ 10:0,15=83,5%</li> <li>▪ 10:0,2= 92%</li> </ul>	Fauzi & R., (2018)

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
					<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,25= 92,5%</li> <li>▪ 10 :0,3=94,5%</li> </ul> Efisiensi Penyisihan Warna berdasarkan perbandingan rasio molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :FeSO <sub>4</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : 0,1 = 79,9 %</li> <li>▪ 10:0,15 = 68%</li> <li>▪ 10:0,2 = 60%</li> <li>▪ 10:0,25 = 84,6%</li> <li>▪ 10 :0, 3 = 58,7 %</li> </ul>	
	-	UV/Fenton/ /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	Laboratorium	pH = 5-7; waktu radiasi = 150 menit; Jumlah H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 25μL, jumlah katalis = 50 mg/50 mL limbah	Efisiensi penurunan warna merah = 94,5%	Dewi & Wardiyati, (2015)
	-	Fotofenton	Laboratorium	Waktu kontak = 15 menit ; pH =3	Efisiensi degradasi warna ketika konsentrasi FeSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 25 g dan konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 25 μL = 98,5% Efisiensi degradasi warna ketika konsentrasi FeSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 125 g dan konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 125 μL = 95,5%	Wardiyati et al., (2012)
Industri Tekstil	Warna = 250 ppm	UV/Fenton/ TiO <sub>2</sub>	Laboratorium	Perbandingan molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub>	Efisiensi Penyisihan Warna berdasarkan konsentrasi katalis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0,05% = 98%</li> <li>▪ 0,1%=98%</li> </ul>	Agustina et al., (2016)

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				O = 1:80 ; Konsentrasi FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O = 4 mM	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0,2%=100%</li> <li>▪ 0,4%=100%</li> </ul> Efisiensi Penyisihan COD berdasarkan konsentrasi katalis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0,05% = 74,5%</li> <li>▪ 0,1% = 78,9%</li> <li>▪ 0,2% = 82,6%</li> <li>▪ 0,4% = 92%</li> </ul>	
	COD = 2890,31 mg/L	Elektrofenton	Laboratorium	Perbandingan molaritas H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : FeSO <sub>4</sub> = 10:0,2 ; pH =4 ; Waktu kontak = 180 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan tegangan listrik dan jarak elektroda : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 6 volt, 2 cm = 92,9%</li> <li>▪ 7 volt, 4 cm = 89,8 %</li> <li>▪ 8 volt, 6 cm = 88,4%</li> </ul> Efisiensi penyisihan Warna berdasarkan tegangan listrik dan jarak elektroda : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 6 volt, 2 cm = 98,9%</li> <li>▪ 7 volt, 4 cm = 85,7 %</li> <li>8 volt, 6 cm = 99,5%</li> </ul>	Priyadi & J. A. R., (2019)
				Tegangan listrik =7 volt; jarak elektroda = 4 cm; pH =4 ; Waktu kontak = 180 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan Perbandingan molaritas H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : FeSO <sub>4</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : 0,1 = 94,1 %</li> <li>▪ 10 : 0,2 = 88,7%</li> <li>▪ 10 : 0,3 = 73%</li> </ul> Efisiensi penyisihan warna berdasarkan Perbandingan molaritas H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : FeSO <sub>4</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : 0,1 = 99,2%</li> <li>▪ 10 : 0,2 = 85,1%</li> <li>10 : 0,3 = 72,3%</li> </ul>	
Limbah Cair Pupuk Urea	Urea = 2566,15 ppm	Fenton	Laboratorium	Fe <sup>2+</sup> = 500 ppm; pH =	Efisiensi penyisihan Urea berdasarkan variasi konsentrasi hidrogen peroksida:	Darmadi, (2014)

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				5 ; waktu kontak = 2 jam	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3000 ppm = 72,8%</li> <li>▪ 4000 ppm = 82,7 %</li> <li>▪ 5000 ppm = 91,8%</li> <li>▪ 6000 ppm = 94,45%</li> </ul> 8000 ppm = 100%	
Industri Kelapa Sawit	COD = 1600 mg/L	<i>Peroxymonosulfate</i> /Katalis LaMnO <sub>3</sub> <i>Perovskite</i>	Laboratorium	PMS = 2 g/L ; Konsentrasi katalis = 0,4 g/L; Waktu reaksi = 120 menit ; Suhu = 30° C, pH = 8, pengadukan = 400 rpm	Efisiensi penyisihan COD = 80,5%	Riandy et al., (2018)
	COD = 1700,7 mg/L	<i>Peroxymonosulfate</i> /Katalis LaMnO <sub>3</sub> <i>Perovskite</i>	Laboratorium	PMS = 0,8 g/L ; Konsentrasi katalis = 0,4 g/L; Waktu reaksi = 120 menit ; Suhu = 30° C, pH = 8, pengadukan = 400 rpm	Efisiensi penyisihan COD = 63,54%	Hasrul et al., (2018)
	COD = 9600 ppm, TSS =	Fenton dengan desain Box-Behnken	Laboratorium	Kondisi optimum:	Efisiensi penyisihan COD = 70,77044% Efisiensi penyisihan TSS = 88,3897%	Yulia et al., (2016)



Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
	7700 ppm, dan pH = 6,9			pH = 3; Konsentrasi FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O = 3703,52 ppm; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 5586,43 ppm		
Rumah Sakit	COD = 421,0304 mg/L	Elektro-fenton	Laboratorium	pH =4; jarak elektroda = 4 cm; waktu kontak = 60 menit ; tegangan = 4 volt	Efisiensi penurunan COD berdasarkan rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /COD (g/g) : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2,125 = 47,78%</li> <li>▪ 10 = 89,29%</li> <li>19,16 = 58,23%</li> </ul>	Putri et al., (2020)
			Laboratorium	pH =4; jarak elektroda = 4 cm; waktu kontak = 60 menit ; rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /COD (g/g) = 10	Efisiensi penurunan COD berdasarkan tegangan : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3 volt = 73,03%</li> <li>▪ 4 volt = 89,29%</li> <li>▪ 5 volt = 80,39%</li> </ul>	
	COD = 260,65 ppm dan pH = 7,3	Sonochemical dengan desan Box-Behnken	Laboratorium	pH = 2; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 500 ppm; waktu reaksi = 119,98 menit	Pada akan menurunkan COD sebesar 81,88%	Kusuma et al., (2017)

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
	COD = 580,65 mg/L, BOD = 67,33 mg/L dan pH= 7,2	Fenton	Laboratorium	Rasio COD/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 10 (g/g); Fe <sup>2+</sup> = 200 mg/L; Waktu kontak = 30 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi pH : <ul style="list-style-type: none"> <li>3 = 55,07%</li> <li>5 = 46,33%</li> <li>7,2 = 40%</li> </ul>	Setiawan et al., (2020)
				pH = 7; Fe <sup>2+</sup> = 200 mg/L; Waktu kontak = 30 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi rasio COD/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>2,125 (g/g) = 36,67%</li> <li>10 (g/g) = 40 %</li> <li>20 (g/g) = 15%</li> </ul>	
Limbah Cair Laboratorium	COD = 511,71 mg/L	Fenton skala batch	Laboratorium	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 20%; pH =3; waktu reaksi = 1 jam	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan dosis fenton: <ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 100 = 47,89%</li> <li>1 : 200 = 56,34%</li> <li>1 : 300 = 83,10%</li> <li>1 : 400 = 71,83%</li> </ul>	Cahyana & Permadi, (2018)
Limbah Cair Industri Mie	Tartrazin = 17,912 ppm dan pH =5	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV	Laboratorium	Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0,01 M	Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi pH: <ul style="list-style-type: none"> <li>2 = 67%</li> <li>5 = 58%</li> <li>7 = 20%</li> <li>9 = 22%</li> <li>12 = 8%</li> </ul> Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi waktu kontak: <ul style="list-style-type: none"> <li>1 jam = 30%</li> <li>2 jam = 38%</li> </ul>	Setyaningtyas & Dwiasi, (2012)

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
					<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3 jam = 42%</li> <li>4 jam = 45%</li> </ul>	
				Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0,02 M	<p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 = 62%</li> <li>▪ 5 = 56 %</li> <li>▪ 7 = 25%</li> <li>▪ 9 = 28%</li> <li>▪ 12 = 7%</li> </ul> <p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi waktu kontak:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 jam = 30%</li> <li>▪ 2 jam = 36%</li> <li>▪ 3 jam = 40%</li> <li>4 jam = 42%</li> </ul>	
				Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0,03 M	<p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 = 69%</li> <li>▪ 5 = 50%</li> <li>▪ 7 = 19%</li> <li>▪ 9 = 17%</li> <li>▪ 12 = 10%</li> </ul> <p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi waktu kontak:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 jam = 43%</li> <li>▪ 2 jam = 44%</li> <li>▪ 3 jam = 42%</li> <li>4 jam = 39%</li> </ul>	

Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
Limbah Cair Eleokimia	COD = 939 mg/L, TDS = 1313 mg/L, TSS = 420 mg/L, pH = 8,18 dan suhu = 30,3°C	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV	Laboratorium	Waktu reaksi = 60 menit	<p>Kemampuan degradasi COD dengan variasi konsentrasi hidrogen peroksida :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 25 mL = 71,56 %</li> <li>▪ 50 mL = 72,1 %</li> <li>▪ 75 mL = 70,39%</li> <li>▪ 100 mL = 76,78%</li> </ul> <p>Kemampuan degradasi TSS dengan variasi konsentrasi hidrogen peroksida :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 25 mL = 22,14 %</li> <li>▪ 50 mL = 40,48 %</li> <li>▪ 75 mL = 29,05 %</li> <li>100 mL = 46,19%</li> </ul>	Chuango et al., (2013)
Limbah Cair Industri Batu Bara	pH = 5, Fe = 2,2 mg/L dan Hg = 0,0003 mg/L	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	Laboratorium	Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 30% ; Waktu reaksi = 1 jam	<p>Efisiensi penyisihan Fe berdasarkan pH :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 45%</li> <li>▪ 6 = 47%</li> <li>▪ 7 = 49%</li> </ul> <p>Efisiensi penyisihan Hg berdasarkan pH :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 26%</li> <li>▪ 6 = 43%</li> <li>7 = 60%</li> </ul>	Marhaini & Wibowo, (2016)
Limbah Cair Industri Tapioka	-	O <sub>3</sub> /GAC	Laboratorium	Waktu kontak = 60 menit; dosis ozon = 0,25 gr/jam	<p>Persentase penyisihan CN dengan variasi pH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 90,69 %</li> <li>▪ 7 = 95,34%</li> <li>▪ 9 = 96,27 %</li> </ul> <p>Persentase penyisihan COD dengan variasi pH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 40,38%</li> <li>▪ 7 = 13,46%</li> <li>▪ 9 = 25 %</li> </ul> <p>Persentase penyisihan BOD dengan variasi pH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 39,39 %</li> </ul>	Enjarlis & Hardi, (2010)

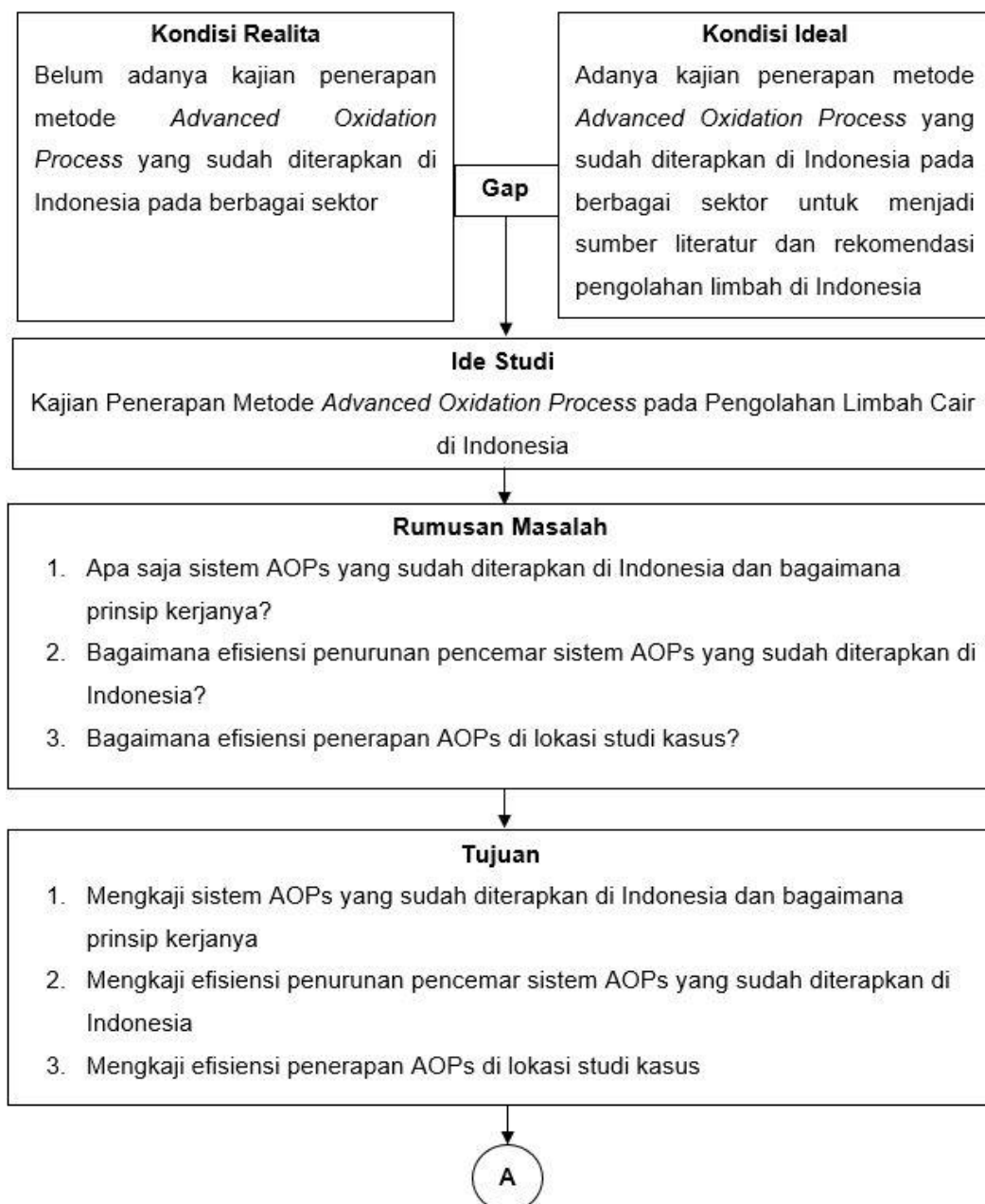
Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
					<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 7 = 18,18%</li> <li>▪ 9 = 27,27 %</li> </ul> Persentase penyisihan TSS dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 20 %</li> <li>▪ 7 = 30 %</li> <li>9 = 40%</li> </ul>	
				Waktu kontak = 90 menit; dosis ozon = 0,25 gr/jam	Persentase penyisihan CN dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 92,55 %</li> <li>▪ 7 = 97,2%</li> <li>▪ 9 = 98,14 %</li> </ul> Persentase penyisihan COD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 71,15 %</li> <li>▪ 7 = 32,7 %</li> <li>▪ 9 = 63,46 %</li> </ul> Persentase penyisihan BOD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 74,24 %</li> <li>▪ 7 = 31,81%</li> <li>▪ 9 = 66,67 %</li> </ul> Persentase penyisihan TSS dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 60 %</li> <li>▪ 7 = 70 %</li> <li>9 = 80 %</li> </ul>	
				Waktu kontak = 120 menit; dosis ozon = 0,25 gr/jam	Persentase penyisihan CN dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 96,27 %</li> <li>▪ 7 = 98,1%</li> <li>▪ 9 = 98,53 %</li> </ul> Persentase penyisihan COD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 90,69 %</li> <li>▪ 7 = 98,1%</li> <li>▪ 9 = 98,53 %</li> </ul>	

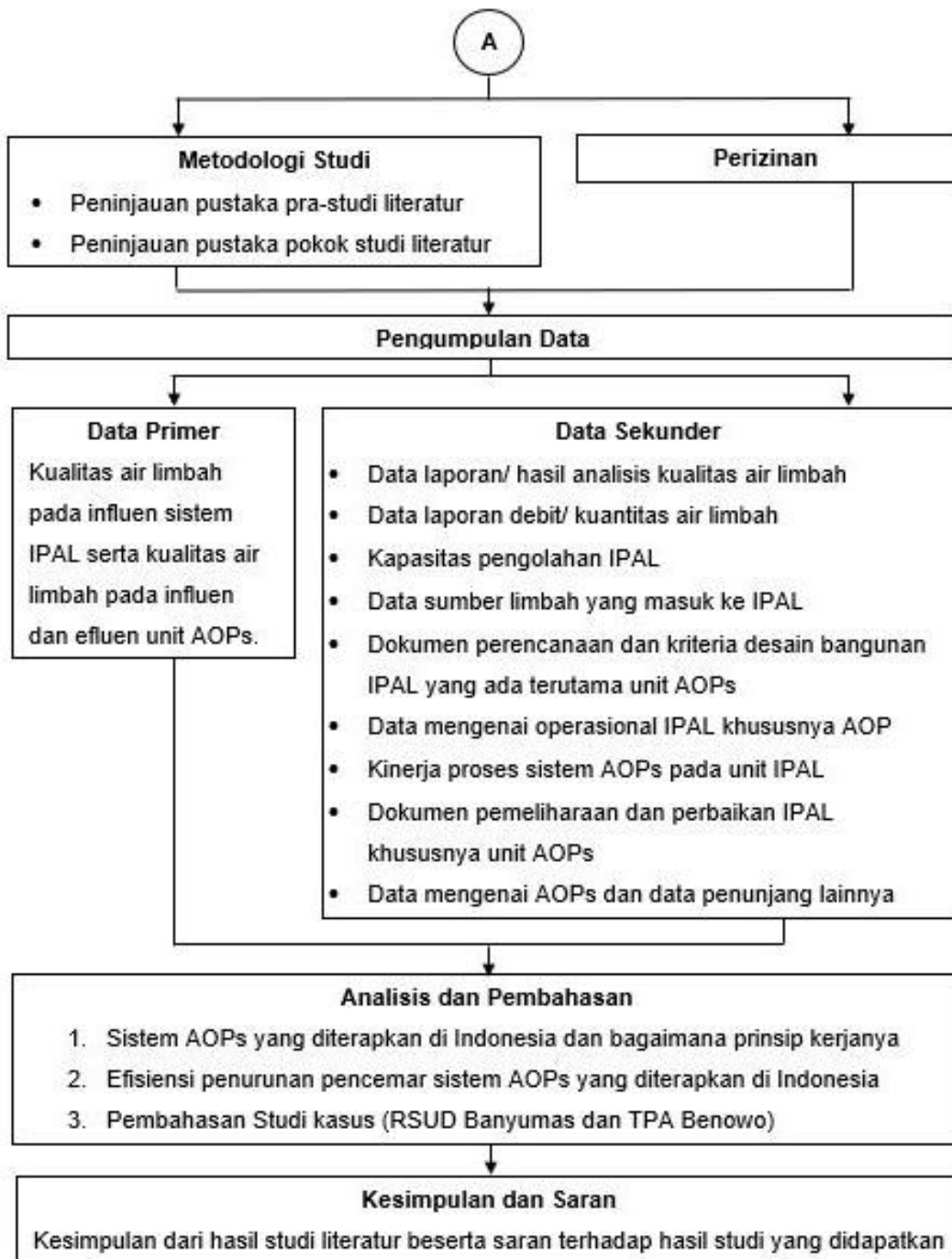
Jenis Limbah	Konsentrasi Limbah	Sistem AOPs	Skala	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
					Persentase penyisihan BOD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 70,13 %</li> <li>▪ 7 = 73,76 %</li> <li>▪ 9 = 82,42 %</li> </ul> Persentase penyisihan TSS dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 84 %</li> <li>▪ 7 = 86 %</li> <li>▪ 9 = 90%</li> </ul>	
Air Limbah Domestik	COD = 4160 mg/L, MBAS = 5,781%, <i>Turbidity</i> = 31,3 NTU, pH = 8,67 dan suhu = 30°C	Fenton	Laboratorium	Fe = 35,36 mg/L	Efisiensi penyisihan dengan variasi konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5,2 mM = 72,3%</li> <li>▪ 10,4 mM = 68,6%</li> <li>▪ 15,6 mM = 82,31%</li> <li>▪ 20,8 mM = 67,1%</li> <li>▪ 26 mM = 65,9%</li> </ul>	Elfiana et al., (2013)
Limbah Cair Industri Tahu	COD = 10.545,2 mg/L	UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Laboratorium	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30%) = 20 mL; Suhu = 30°C	Efisiensi penyisihan COD dengan variasi waktu reaksi <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 50 menit = 7,07%</li> <li>▪ 100 menit = 18,44%</li> <li>▪ 150 menit = 23,19%</li> <li>▪ 200 menit = 28,87%</li> <li>▪ 250 menit = 33,62%</li> </ul>	Pontas & Muslim, (2015)

# BAB III METODE PENULISAN

## 3.1 Kerangka Studi

Kerangka studi merupakan diagram yang berisi tahapan-tahapan proses pada penelitian. Kerangka studi disusun dengan tujuan untuk mengetahui alur pengerjaan tugas akhir serta menjadi acuan dalam proses pemilihan literatur, sehingga proses penulisan tugas akhir ini dapat berjalan secara sistematis, terarah dan mudah diamati. Kerangka studi ini berawal dari menemukan gap yang ada sehingga didapatkan ide studi, kemudian merumuskan masalah, menentukan tujuan studi berdasarkan rumusan masalah, mengumpulkan referensi dan mencari data untuk menemukan penyelesaian permasalahan yang ada, kemudian dilakukan pembahasan dan ditarik kesimpulan dan saran. Kerangka studi disajikan pada Gambar 3.1.





**Gambar 3. 1 Kerangka Studi**

### 3.2 Metode Studi

Metode studi terdiri langkah-langkah studi yang akan dilakukan mengikuti kerangka studi yang telah dibuat. Metode studi disusun agar pelaksanaan studi lebih terarah dan mencapai tujuan. Dalam metode studi terdapat ide studi, peninjauan pustaka, perizinan, pengumpulan data, analisis dan pembahasan serta kesimpulan dan saran.



### 3.3.1 Ide Studi

Ide studi pustaka ini diperoleh setelah menemukan gap antara kondisi realita dengan kondisi ideal. Perbandingan antara kondisi realita dengan kondisi ideal yang mendasari ide studi ini sebagai berikut:

- Kondisi Realita : Belum adanya kajian aplikasi metode *Advanced Oxidation Process* yang sudah diterapkan di Indonesia pada berbagai sektor
- Kondisi Ideal : Adanya kajian aplikasi metode *Advanced Oxidation Process* yang sudah diterapkan di Indonesia pada berbagai sektor untuk menjadi sumber literatur dan rekomendasi pengolahan limbah di Indonesia

### 3.3.2 Peninjauan pustaka

Peninjauan Pustaka pada metode studi ini terdiri dari peninjauan pustaka pra-studi literatur dan peninjauan pustaka pokok studi literatur. Pustaka yang ditinjau berupa dasar teori dan juga hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik studi literatur yang dikaji yang kemudian dilakukan tabulasi pustaka agar memudahkan dalam analisis.

#### a. Peninjauan pustaka pra-studi literatur

Tahapan ini merupakan tahapan awal dalam mencari pustaka yang berkaitan dengan topik penerapan metode *advanced oxidation process* dalam pengolahan limbah cair di Indonesia. Penulisan pada tahap ini didasari oleh permasalahan yang ada atau gap yang ada antara kondisi ideal dengan kondisi realita yang kemudian dicari solusi untuk menyelesaikan permasalahan tersebut atau menghilangkan gap yang ada.

#### b. Peninjauan pustaka pokok studi literatur

Tahapan ini merupakan tahapan lanjut dari peninjauan pustaka pra-studi literatur yang bertujuan melengkapi serta mendetailkan pokok-pokok bahasan mengenai topik yang akan dikaji pada tugas akhir ini.

Sumber yang digunakan untuk peninjauan pustaka tersebut yaitu berupa buku teks, jurnal ilmiah nasional dan internasional, makalah, prosiding, tugas akhir (skripsi, tesis, disertasi), dan karya ilmiah lainnya yang relevan dengan topik tugas akhir dengan jumlah minimum 30 pustaka dengan rincian 15 dari jurnal terbaru (5 tahun terakhir) dan 15 dari sumber literatur lain. Pengumpulan literatur didapatkan berdasarkan pencarian pada *Science Direct*, *Google Scholar*, *Mendeley*, *Publish or Perish* dan *Researchgate*.

### 3.3.3 Perizinan

Perizinan dilakukan untuk keperluan pengambilan data primer dan data sekunder. Perizinan dilakukan dengan pembuatan surat izin yang telah ditandatangani oleh Departemen Teknik Lingkungan ITS. Surat izin tersebut ditujukan kepada RSUD Banyumas dan TPA Benowo untuk pengambilan data.

### 3.3.4 Pengumpulan Data

#### 3.3.4.1 Pengumpulan Data Primer

Data primer adalah jenis data yang dikumpulkan secara langsung dari subjek penelitian yang sudah ditetapkan. Data primer yang diperlukan untuk tugas akhir ini adalah kualitas air limbah pada influen sistem IPAL serta kualitas air limbah pada influen dan efluen unit AOPs. Metode pengumpulan data primer yaitu dengan mengambil sampel influen sistem IPAL serta influen dan efluen unit AOPs secara langsung oleh peneliti yang akan dianalisis di laboratorium.

### 3.3.4.2 Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder adalah data-data pendukung untuk penelitian ini yang diperoleh dari instansi terkait dan berbagai sumber literatur. Data sekunder dibutuhkan untuk mendukung data primer baik yang bersifat teknis maupun non teknis. Metode pengumpulan data sekunder yaitu dengan metode dokumentasi dengan melakukan pengumpulan data dari arsip masing-masing tempat studi kasus yang dituju. Data sekunder yang diperlukan untuk tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Data laporan/ hasil analisis kualitas air limbah
- Data laporan debit/ kuantitas air limbah
- Data kapasitas pengolahan IPAL
- Data sumber limbah yang masuk ke IPAL
- Dokumen perencanaan dan kriteria desain bangunan IPAL yang ada terutama unit AOPs
- Data mengenai operasional IPAL khususnya AOPs
- Kinerja proses sistem AOPs pada unit IPAL
- Dokumen pemeliharaan dan perbaikan IPAL khususnya unit AOPs
- Data mengenai AOPs dan data penunjang lainnya

### 3.3.5 Analisis dan Pembahasan

Pada studi literatur ini digunakan teknik analisis data deskriptif. Analisis data deskriptif disajikan dengan mendeskripsikan atau menggambarkan suatu hal secara jelas dan terperinci yang bersumber dari pustaka-pustaka yang sudah ditinjau agar tujuan pada tugas akhir tercapai. Kemudian, dilanjutkan dengan analisis data dan pembahasan pada studi kasus. Studi kasus yang diambil yaitu tempat-tempat yang sudah menerapkan metode *Advanced Oxidation Process*, diantaranya RSUD Banyumas dan TPA Benowo. Pada pembahasan studi kasus berisi mengenai karakteristik limbah studi kasus beserta sumber limbahnya, kuantitas air limbah beserta kapasitas pengolahannya, sistem AOPs yang diterapkan beserta sistem kerjanya, efisiensi penyisihan pencemar pada sistem AOPs yang diterapkan, mengenai pemeliharaan dan perbaikan pada IPAL khususnya unit AOPs serta kelebihan dan kekurangan yang dirasakan selama penerapan AOPs.

### 3.3.6 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan didapatkan berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya. Kesimpulan berisi jawaban dari rumusan masalah dan berdasarkan tujuan studi yang akan dicapai. Saran berisi rekomendasi yang berupa rujukan untuk studi literatur selanjutnya dan berisi hal-hal yang sekiranya dapat dikembangkan lebih lanjut untuk masa mendatang.

## 3.3 Sistematika Laporan Tugas Akhir

Sistematika penulisan laporan tugas akhir akan disusun sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan  
Bab ini menguraikan mengenai latar belakang penulisan tugas akhir, penjabaran rumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai, ruang lingkup yang membatasi penulisan tugas akhir ini serta manfaat yang akan didapatkan dari kajian literatur ini.
- Bab 2 : Tunjauan Pustaka  
Bab ini menguraikan berbagai hasil peninjauan mengenai topik tugas akhir yang dikaji
  - 2.1 Limbah Cair
  - 2.2 Klasifikasi Limbah Cair
  - 2.3 Pengolahan Limbah Cair

- 2.3.1 Pengolahan Fisik
- 2.3.2 Pengolahan Kimia
- 2.3.3 Pengolahan Biologis
- 2.4 Baku Mutu Limbah Cair
  - 2.4.1 Baku Mutu Lindi
  - 2.4.2 Baku Mutu Limbah Cair Domestik
- 2.5 Metode Advanced Oxidation Process
  - 2.5.1 Jenis Jenis Sistem Advanced Oxidation Process
  - 2.5.2 Kelebihan dan Kekurangan Metode Advanced Oxidation Process
  - 2.5.3 Komponen Sistem yang digunakan pada masing masing sistem Advanced Oxidation Process
- 2.6 Limbah yang dapat Diolah dengan Metode Advanced Oxidation Process
- 2.7 Posisi Metode Advanced Oxidation Process pada pengolahan limbah
- 2.8 Aplikasi Metode Advanced Oxidation Process pada pengolahan limbah
- Bab 3 : Metode Penulisan
 

Bab ini menguraikan bagaimana alur proses pengerjaan tugas akhir serta jenis sumber-sumber yang digunakan untuk kajian literatur.

  - 3.1 Kerangka Studi
  - 3.2 Metode Studi
  - 3.3 Sistematika Studi
- Bab 4 : Analisis dan Pembahasan
 

Bab ini menguraikan hasil analisis dan pembahasan yang didasarkan pada literatur dan data pada studi kasus sehingga menjawab rumusan masalah yang ada.

  - 4.1 Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia prinsip
  - 4.2 Efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia
  - 4.3 Penerapan AOPs di lokasi studi kasus
    - 4.3.1 Penerapan AOPs di RSUD Banyumas
    - 4.3.2 Penerapan AOPs di TPA Benowo
- Bab 5 : Kesimpulan dan Saran
 

Bab ini menguraikan kesimpulan yang merupakan jawaban dari rumusan masalah dan berdasarkan tujuan tugas akhir yang akan dicapai dan saran yang perlu disampaikan. Saran berisi rekomendasi untuk penelitian selanjutnya serta hal-hal yang perlu dikaji lebih lanjut di masa yang akan datang.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia**

Berdasarkan Tabel 2.8 dapat diketahui bahwa, sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia sebagai berikut:

##### **4.1.1 Sonochemical**

*Sonochemical* merupakan salah satu jenis metode AOPs yang membutuhkan radiasi ultrasonik dalam menghasilkan radikal bebas yang berupa senyawa radikal  $\text{OH}^*$  sehingga zat-zat pencemar akan teroksidasi. Frekuensi ultrasonik yang digunakan pada proses ini yaitu 20 kHz-1 MHz (Kusuma et al., 2017). Proses *sonochemical* biasanya menggabungkan antara gelombang ultrasonik dengan hidrogen peroksida atau ozon. Mekanisme proses pada sistem sonochemical terdapat pada persamaan (2.4) hingga (2.14).

Proses *sonochemical* yang dikombinasikan dengan hidrogen peroksida, lebih efektif dalam mendegradasi kontaminan daripada proses pengolahan secara terpisah antara US (gelombang ultrasonik) dan hidrogen peroksida. Hal itu terjadi dikarenakan hidrogen peroksida merupakan oksidator kuat yang menghasilkan radikal hidroksil melalui proses dekomposisi hidrogen peroksida. Pada saat hidrogen peroksida dikombinasikan dengan gelombang ultrasonik, maka getaran dari gelombang ultrasonik akan merangsang pembentukan radikal hidroksil. Lalu, radikal hidroksil yang dihasilkan akan mendegradasi polutan-polutan yang ada.

Di Indonesia, metode ini pernah diterapkan dalam mengolah limbah cair rumah sakit dalam skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Kusuma et al. (2017) dengan limbah cair yang digunakan berasal dari bak pengumpul di Instalasi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit Umum Zainal Abidin Banda Aceh yang memiliki karakteristik COD sebesar 260,65 ppm dan pH 7,3. Penelitian tersebut didesain dengan variasi pH, konsentrasi hidrogen peroksida dan waktu reaksi dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh parameter-parameter reaksi terhadap penurunan COD dalam pengolahan limbah rumah sakit dengan metode *sonochemical* serta menentukan kondisi optimum dari variabel proses dengan menggunakan RSM *Box-Behnken*. Pada penelitian tersebut, sistem yang digunakan yaitu *sonochemical* dikombinasikan dengan hidrogen peroksida yang berfungsi sebagai oksidator.

##### **4.1.2 Fenton**

Fenton merupakan salah satu jenis AOPs yang menggabungkan antara  $\text{H}_2\text{O}_2$  dengan reagen  $\text{Fe}^{2+}$ . Reagen  $\text{Fe}^{2+}$  pada proses ini digunakan sebagai penghancur kontaminan organik pada limbah cair karena reagen ini dapat mendegradasi kontaminan organik limbah terutama dalam fase cairan (Patil & Raut, 2014). Proses ini tidak akan menimbulkan bahaya baru bagi lingkungan karena hasil akhirnya berupa karbon dioksida dan air. Keuntungan lain dari proses fenton ini yaitu memiliki waktu reaksi yang lebih singkat dibandingkan jenis AOPs yang lain, hanya membutuhkan hidrogen peroksida sedikit dan dapat mengurai senyawa organik sulit terurai (Kusuma et al., 2017). Mekanisme proses pada sistem fenton dapat dilihat pada persamaan (2.26) hingga (2.30).

Di Indonesia, metode ini pernah diterapkan dalam mengolah limbah cair industri pupuk urea dalam skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Darmadi (2014), dengan limbah cair yang digunakan berasal dari inlet kolam penampungan dan pengolahan limbah (KPPL) PT. Pupuk Iskandar Muda (PIM) Lhokseumawe yang mengandung urea sebesar 2566,15 ppm. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem AOPs berbasis

fenton dalam mendegradasi urea. Reaksi dekomposisi urea oleh radikal bebas yang dihasilkan pada sistem fenton dapat dilihat pada persamaan (4.1) (Darmadi, 2014).



Radikal hidroksil yang terbentuk pada sistem ini akan bereaksi dengan urea dan menghasilkan amonium dan ion sianat.

Selain itu, metode ini pernah diterapkan dalam mengolah limbah cair industri penyamakan kulit skala laboratorium. Penelitian ini dilakukan oleh Sholeh et al. (2013), dengan limbah cair yang digunakan berasal dari outlet pengolahan sekunder IPAL industri penyamakan kulit Sitimulyo, Yogyakarta. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui kondisi operasi yang optimum dalam mengolah limbah cair industri penyamakan kulit dengan sistem fenton.

Lalu, penelitian yang serupa juga pernah dilakukan dalam pengolahan limbah industri kelapa sawit skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Yulia et al. (2016), dengan limbah cair yang digunakan berasal dari limbah keluaran pertama kolam ketiga (Kolam Anaerobik) pada IPAL PT. Syaokath Sejahtera di Kabupaten Bireuen yang mengandung COD 9600 ppm, TSS 7700 ppm dan pH 6,9. Tujuan penelitian ini yaitu mengetahui kondisi paling optimum pH, konsentrasi besi(II) dan konsentrasi hidrogen peroksida dalam pengolahan limbah dengan sistem fenton.

Sistem fenton pernah diterapkan dalam pengolahan limbah domestik. Penelitian tersebut dilakukan Elfiana et al., (2013) menggunakan limbah yang berasal dari saluran drainase pintu I inlet waduk reservoir Gampong Pusong, Lhokseumawe dengan karakteristik pH 8,67, COD 4160 mg/L, Deterjen (MBAS) 5,781%, *Turbidity* 31,30 NTU dan Temperatur 30°C. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektifitas fenton dalam menurunkan konsentrasi COD pada limbah domestik.

Sistem fenton pernah juga digunakan dalam mengolah limbah salah satu Rumah Sakit di Yogyakarta. Penelitian tersebut dilakukan oleh Setiawan et al., (2020) dengan sampel diambil dari bak equalisasi di IPAL Rumah Sakit tersebut yang memiliki karakteristik COD 580 mg/L, BOD 67,33 mg/L dan pH 7. Tujuan melakukan itu yaitu untuk mengetahui pengaruh variabel rasio COD/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan pH terhadap penurunan kadar COD pada pengolahan limbah rumah sakit.

Kemudian, sistem ini juga digunakan dalam mengolah limbah cair laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Cahyana & Permadi, (2018) dengan limbah yang dipakai adalah limbah yang berasal dari laboratorium dengan karakteristik COD sebesar 511,71 mg/L. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh dosis fenton dalam pengolahan limbah cair laboratorium dengan sistem fenton.

#### 4.1.3 Peroxymonosulfate/Katalis

*Peroxymonosulfate*/Katalis merupakan sistem AOPs yang berbeda dengan sistem yang lain. Pada sistem ini, radikal bebas yang dihasilkan bukan radikal hidroksil namun berupa radikal sulfat. Radikal sulfat dihasilkan dari aktivasi *peroxymonosulfate* (PMS) yang dikombinasikan dengan katalis. Sistem ini memiliki kelebihan dibandingkan yang lain karena alat yang dibutuhkan lebih sederhana dan tidak membutuhkan energi yang tinggi. Katalis yang digunakan biasanya berbasis logam tetapi dalam penggunaannya katalis ini menimbulkan pencemaran air karena terjadi *leaching*. Sehingga katalis non logam menjadi pilihan yang cukup menjanjikan karena memiliki kelebihan yaitu tidak menghasilkan polusi, membutuhkan biaya yang rendah dan memiliki stabilitas termal dan kimia yang baik (Apriliani et al., 2019). Mekanisme yang terjadi pada sistem ini dapat dilihat pada persamaan (2.44) sampai (2.48)

Di Indonesia, sistem ini pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri kelapa sawit skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Riandy et al., (2018) dan oleh Hasrul et al. (2018) dengan menggunakan limbah cair yang berasal dari kolam *Land*

*Application* atau kolam yang berada setelah unit pengolahan biologis di IPAL PT. Perkebunan Nusantara V PKS Sei Galuh. Untuk katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah  $\text{LaMnO}_3$  *Perovskite*. Penelitian ini menggunakan kombinasi antara dan  $\text{LaMnO}_3$  *Perovskite* dengan harapan bahwa kombinasi tersebut akan menghasilkan sulfat radikal yang dapat mendegradasi senyawa organik pada limbah cair industri kelapa sawit tersebut. Perbedaan penerapan pada kedua penelitian tersebut terletak pada banyaknya penambahan *Peroxymonosulfate*.

Selain itu, sistem ini juga pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri pulp dan kertas skala laboratorium. Penelitian mengenai penerapan tersebut dilakukan oleh Apriliani et al. (2019) dengan limbah cair yang berasal dari salah satu industri pulp dan kertas yang ada di provinsi Riau. Katalis yang digunakan pada penelitian ini yaitu katalis *nitrogen-doped three-dimensional carbon framework* (3D NCF) yang merupakan katalis non logam. Katalis non logam dapat disintesis dari turunan ZIF-67 (*Zeolitic Imidazole Framework*) yang memiliki keunggulan yaitu luas permukaan dan volume pori yang besar serta termal dan kimia yang baik. Katalis 3D NCF dibuat melalui tiga tahap yaitu sintesis ZIF-67, Co/NC dan 3D NCF.

#### 4.1.4 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara radiasi UV dengan oksidan yang berupa hidrogen peroksida. Hidrogen peroksida merupakan bahan pengoksidasi sangat kuat yang mampu mendegradasi beberapa campuran yang bersifat garam maupun non-garam di dalam media yang berfase cair. Selain itu, sinar UV juga mampu mendegradasi kontaminan dengan memicu perpecahan ikatan. Dengan mengkombinasikan keduanya, dapat menciptakan suatu proses yang efisien dan cepat dalam mendegradasi pencemar (Setyaningtyas & Dwiasi, 2012).

Mekanisme yang terjadi pada sistem ini merupakan reaksi oksidasi kimiawi yaitu terjadinya pemecahan molekul hidrogen peroksida menjadi 2 molekul radikal hidroksil ketika hidrogen peroksida terpapar sinar UV. Hal ini akan meningkatkan proses fotodegradasi. Persamaan mekanisme yang terjadi dapat dilihat pada persamaan (2.20) hingga (2.25).

Di Indonesia, metode ini juga pernah diterapkan dalam mengolah limbah cair industri mie dalam skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Setyaningtyas dan Dwiasi pada tahun 2012, dengan limbah cair yang digunakan berasal industri pembuatan mie kuning yang berada di daerah Karangpucung, Cilacap. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pH dan waktu kontak terhadap kemampuan sistem AOPs berbasis UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dalam mendegradasi warna sintesis berupa Tartrazin.

Selain itu, metode ini juga pernah diterapkan dalam mengolah limbah cair pabrik eleokimia dalam skala laboratorium. Penelitian ini dilakukan oleh Chuango et al. (2013), dengan limbah cair yang digunakan berkarakteristik COD 939 mg/L, TDS = 1313 mg/L, TSS 420 mg/L, pH 8,18 dan suhu 30,3°C. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan degradasi pada masing masing karakteristik.

Lalu, metode ini pernah diterapkan lagi pada pengolahan limbah cair industri tahu dalam skala laboratorium. Penelitian ini dilakukan oleh Pontas & Muslim (2015), dengan limbah cair yang berasal dari industri tahu yang berada di daerah Banda Aceh dengan kandungan COD sebesar 10.545,2 mg/L. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi terhadap kemampuan AOPs dengan sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dalam mengolah limbah cair industri tahu.

#### 4.1.5 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>

Sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> merupakan gabungan antara iradiasi, oksidan dan fotokatalis. Sistem ini dipertimbangkan untuk meningkatkan radikal <sup>\*</sup>OH dan meningkatkan hasil akhir

rasio BOD/COD. Pada proses ini, elektron pada pita konduksi dan lubang pada pita valensi yang terdapat pada titanium dioksida akan menyerap sinar UV dan adanya H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> akan meningkatkan jumlah akseptor elektron sehingga semakin meningkatkan jumlah radikal bebas yang dihasilkan (Yuningrat et al., 2012). Berikut reaksi yang terjadi pada sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>.



Di Indonesia, metode ini juga pernah diterapkan dalam mengolah lindi skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Yuningrat et al. (2012), dengan limbah cair yang digunakan berasal dari saluran pengeluaran *cell landfill* di TPA Bengkala Singaraja. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pH campuran, konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> terhadap kemampuan sistem AOPs berbasis UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dalam mendegradasi BOD dan COD pada lindi.

Selain itu, metode ini juga pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri batu bara skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Marhaini & Wibowo (2016), dengan limbah cair yang digunakan berasal dari PT. Bukit Asam yang berlokasi di Tanjung Enim. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem AOPs berbasis UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dalam mendegradasi logam berat yaitu Fe dan Hg yang ada pada limbah cair industri tambang.

#### 4.1.6 O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara ozon dengan oksidan yang berupa hidrogen peroksida. Sistem ini merupakan sistem yang umum digunakan karena penggunaannya yang mudah, relatif aman dan biaya yang cukup murah (Ristiawan & Syafila, 2015). Penggunaan sistem ini lebih efektif dibandingkan dengan penggunaan ozon atau hidrogen peroksida sendiri-sendiri. Pada sistem ini, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> berperan sebagai inisiator dalam mendekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil dan superoksida yang kemudian bereaksi secara beruntun dengan ozon. Dengan adanya penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> membuat proses dekomposisi ozon berjalan dengan lebih cepat sehingga sangat efektif untuk mendegradasi kontaminan (Gelardiansyah et al., 2015). Persamaan pada sistem ini dapat dilihat pada persamaan (2.15) dan (2.16).

Di Indonesia, sistem ini pernah diterapkan pada pengolahan lindi dan limbah industri pulp dan kertas. Penerapan sistem ini pada pengolahan lindi dilakukan oleh Fadiah et al. pada tahun 2017. Penelitian tersebut menggunakan limbah yang berasal dari inlet tempat pengolahan lindi pada TPA Sarimukti, Bandung Barat dengan karakteristik pH 8,6-8,7, suhu 25-27°C, kekeruhan 80-90 NTU dan DHL 2470-3000 µmhos/cm.

Untuk penerapan sistem ini pada pengolahan industri pulp dan kertas, dilakukan oleh Ristiawan dan Syafila pada tahun 2015. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan limbah yang berasal dari salah satu pabrik kertas di Bekasi dengan karakteristik pH 7,86, Kekeruhan 256 NTU, BOD 140 mg/L, COD 1322 mg/L, TOC 749 mg/L, Lignin 77 mg/L dan AOX < 0,01 ppm. Berdasarkan rasio BOD/COD diketahui bahwa air limbah tersebut memiliki sifat sulit didegradasi melalui proses biologis biasa. Tujuan penelitian yang dilakukan oleh Ristiawan dan Syafila yaitu melihat pengaruh variasi *feeding rate* ozon, dosis hidrogen peroksida, pH dan waktu kontak terhadap laju degradasi lignin.

#### 4.1.7 O<sub>3</sub>/GAC

Sistem O<sub>3</sub>/GAC merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara ozon dengan GAC atau *Granular Activated Carbon*. Menurut Enjarlis & Hardi (2010), teknologi AOPs dengan sistem tersebut lebih cocok dikembangkan di Indonesia karena karbon aktif mudah didapat dan tidak memerlukan regenerasi karbon aktif



karena kontaminan dalam pori karbon aktif dapat diurai oleh ozon serta hemat dalam pemakaian ozon. Sistem ini juga sangat efektif dalam memperbaiki kualitas air limbah industri dan domestik baik yang mengandung zat *biodegradable* maupun *non-biodegradable*. Berikut mekanisme pada metode O<sub>3</sub>/GAC.

1. Dekomposisi homogen :

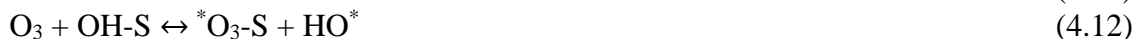


2. Dekomposisi Heterogen pada permukaan karbon aktif

Pada pH 2-6



Pada pH >= 6



3. Reaksi propagasi dan terminasi homogen



Sistem ini termasuk dalam ozonasi katalik heterogen dimana GAC berfungsi sebagai katalis padat yang mempercepat terbentuknya senyawa radikal karena GAC tak hanya bertindak sebagai adsorben di sistem ini, tetapi juga sebagai katalis yang meningkatkan reaksi oksidasi ozon sehingga dapat mendegradasi kontaminan lebih cepat dan efisien. Selain itu, GAC di sistem ini juga berfungsi untuk membantu proses absorpsi mikropolutan hasil oksidasi dari sistem AOPs (Ayuningtyas, 2020).

Di Indonesia, sistem ini pernah diteliti dalam penerapannya di pengolahan limbah cair industri tapioka. Penelitian tersebut dilakukan oleh Enjarlis dan Hardi pada tahun 2010 dengan menggunakan limbah cair yang berasal dari limbah tapioka. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi optimum pH dan dosis ozon terhadap penurunan kandungan sianida dan COD dalam limbah cair industri tapioka dengan sistem ini.

Selain itu, sistem ini juga pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri batik skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Ayuningtyas, (2020) pada tahun 2020 dengan menggunakan limbah cair yang berasal dari limbah batik Giriloyo, Yogyakarta dengan karakteristik warna sebesar 1.000 Pt-Co, pH 8 dan kadar fenol sebesar 0,099 mg/L. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi pengaruh dan kondisi optimum dari waktu kontak dan massa karbon aktif terhadap kadar warna dan fenol pada pengolahan limbah cair industri batik dengan sistem ini.

#### 4.1.8 UV/Fenton/ Katalis

Sistem UV/Fenton/ Katalis merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara radiasi sinar UV, fenton dan katalis. Sistem fenton dan sistem UV/katalis sama sama menghasilkan radikal hidroksil, dengan mengkombinasikan kedua sistem itu dapat meningkatkan produksi radikal hidroksil sehingga dapat meningkatkan degradasi kontaminan. Mekanisme yang terjadi pada sistem ini yaitu ketika sinar UV mengenai titanium dioksida akan membentuk radikal hidroksil dan semakin banyak titanium dioksida

yang terkena sinar UV, semakin banyak pula radikal hidroksil yang terbentuk. Berikut reaksi yang terjadi dalam proses UV/Fenton/Katalis (Fauzi & R., 2018).



Di Indonesia, sistem ini pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri batik skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Dewi & Wardiyati (2015) dengan menggunakan limbah cair yang berasal dari perusahaan batik Roro Djonggrang Yogyakarta. Katalis yang digunakan pada penelitian ini yaitu  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ . Katalis ini digunakan karena dapat menaikkan efisiensi degradasi dan mempercepat proses degradasi. Hal itu terjadi karena sifat adsorpsi  $\text{SiO}_2$ , dimana  $\text{SiO}_2$  akan mengadsorpsi zat warna yang ada dalam larutan tersebut lalu zat warna yang teradsorpsi didegradasi oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas dari katalis tersebut terhadap limbah cair batik warna merah serta kondisi optimum dari proses degradasinya.

Selain itu, penerapan ini juga pernah dilakukan dengan jenis limbah yang sama, namun tempatnya berbeda. Penelitian tersebut dilakukan oleh Fauzi & R pada tahun 2018 dengan menggunakan limbah cair yang berasal dari Industri Batik Tulis Namiroh Jetis, Sidoarjo. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja AOPs dengan sistem fenton, fotokatalis dan kombinasi keduanya. Katalis yang digunakan pada penelitian ini yaitu titanium dioksida.

Titanium dioksida merupakan katalis yang sering digunakan dalam pengolahan limbah karena bersifat semikonduktor yang baik, bersifat ramah lingkungan, memiliki harga yang murah dan mudah didapatkan serta katalis ini bisa digunakan kembali (*reuse*). Penelitian mengenai sistem ini dengan menggunakan titanium dioksida juga pernah dilakukan oleh Agustina et al. (2016) dengan tujuan untuk mengetahui kondisi optimum pada degradasi salah satu zat warna sintesis yaitu *procion red*.

#### 4.1.9 Fotofenton

Fotofenton merupakan salah satu jenis AOPs yang mengkombinasikan sistem fenton dengan radiasi sinar UV. Sinar UV jika dikombinasikan dengan fenton akan mempercepat proses fenton. Selain itu, sinar UV juga akan membantu meningkatkan dekomposisi organik dikarenakan pada proses fotofenton terdapat  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$  yang dapat menyerap cahaya dan memberikan tambahan radikal hidroksil serta akan menghasilkan sedikit  $\text{Fe}^{2+}$  sehingga akan mengurangi hasil endapan fenton (Lesa et al., 2020). Mekanisme pada sistem ini yaitu pertama ion  $\text{Fe}^{2+}$  direaksikan dengan hidrogen peroksida sehingga menghasilkan ion  $\text{Fe}^{3+}$  dan radikal hidroksil. Kemudian, ion  $\text{Fe}^{3+}$  yang terbentuk akan bereaksi dengan sinar UV dan dihasilkan  $\text{Fe}^{2+}$  dan radikal hidroksil. Persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan (2.26) hingga (2.30).

Di Indonesia, sistem ini pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri batik skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Wardiyati et al. (2012) dengan menggunakan limbah cair yang berasal dari perusahaan batik Roro Djonggrang Yogyakarta. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui kondisi optimum dalam mendegradasi warna biru pada limbah industri batik dengan metode fotofenton. Selain itu, sistem ini juga pernah diterapkan pada pengolahan lindi skala laboratorium. Penelitian tersebut dilakukan oleh Lesa et al., (2020) dengan menggunakan lindi dari Rumah Kompos Wonorejo, Surabaya. Penelitian

tersebut dilakukan secara batch dan kontinu yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan fotofenton dalam mendegradasi TSS, COD, BOD dan PO<sub>4</sub>.

#### 4.1.10 Elektrofenton

Elektrofenton adalah salah satu jenis AOPs yang mengkombinasikan antara proses elektrokoagulasi dengan reaksi fenton. Secara umum, terdapat dua aplikasi elektrofenton. Yang pertama adalah reagen fenton ditambahkan ke dalam reaktor dari luar dan menggunakan elektroda inert yang memiliki sifat katalitik yang tinggi dan yang kedua yaitu hidrogen peroksida ditambahkan dari luar dan Fe<sup>2+</sup> disediakan dengan mengorbankan anoda (Priyadi & J. A. R., 2019). Reaksi kimia dari proses elektrofenton dapat dilihat pada persamaan (2.37) sampai (2.40). Keuntungan menggunakan sistem ini yaitu mengkonsumsi sedikit energi, reaksinya lebih cepat, biaya operasinya lebih murah dan perawatannya mudah (Putri et al., 2020).

Di Indonesia, sistem ini pernah diterapkan pada pengolahan limbah industri tekstil. Penelitian tersebut dilakukan oleh Priyadi & J. A. R. (2019) dengan menggunakan limbah proses pencelupan warna benang dari PT. Sorin Setosa di daerah Krian, Jawa Timur dengan karakteristik limbah mengandung COD sebesar 2890,31 mg/L. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui kondisi optimum dalam pengolahan limbah cair industri tekstil dengan sistem elektrofenton.

Selain itu, sistem ini juga pernah diterapkan dalam pengolahan limbah cair rumah sakit. Penelitian tersebut dilakukan oleh Putri et al., (2020) dengan menggunakan limbah yang berasal dari bak equalisasi di IPAL Rumah Sakit Kota Yogyakarta. Limbah cair yang masuk ke dalam IPAL tersebut merupakan limbah domestik yang berupa limbah medis maupun non medis. Karakteristik limbah tersebut yaitu memiliki kadar COD 421, 0304 mg/L dengan pH 7,3.

Dari subbab 4.1.1 hingga 4.1.10 diketahui bahwa jenis limbah yang dapat diolah pada masing masing sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1 Jenis Limbah yang dapat diolah pada Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia**

No	Sistem AOPs	Limbah yang diolah
1	Sonochemical	Rumah sakit <sup>1</sup>
2	Fenton	Industri pupuk urea <sup>2</sup> , industri penyamakan kulit <sup>2</sup> , industri kelapa sawit <sup>4</sup> , domestik <sup>5</sup> , rumah sakit <sup>6</sup> , laboratorium <sup>7</sup>
3	Peroxymonosulfate/ Katalis	Industri kelapa sawit <sup>8,9</sup> dan industri pulp dan kertas <sup>10</sup>
4	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Industri mie <sup>11</sup> , industri eleokimia <sup>12</sup> dan industri tahu <sup>13</sup>
5	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	Lindi <sup>14</sup> dan industri batubara <sup>15</sup>
6	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Industri pulp & kertas <sup>16</sup> dan lindi <sup>17</sup>
7	O <sub>3</sub> /GAC	Industri batik <sup>18</sup> dan tapioka <sup>19</sup>
8	UV/Fenton/Katalis	Industri batik <sup>20,21</sup> dan tekstil <sup>22</sup>
9	Fotofenton	Industri batik <sup>23</sup> dan lindi <sup>24</sup>

No	Sistem AOPs	Limbah yang diolah
10	Elektrofenton	Industri tekstil <sup>25</sup> dan rumah sakit <sup>26</sup>

Sumber : <sup>1</sup>Kusuma et al., (2017); <sup>2</sup>Darmadi, (2014); <sup>3</sup>Sholeh et al., (2013); <sup>4</sup>Yulia et al., (2016); <sup>5</sup>Elfiana et al., (2013)<sup>6</sup>Setiawan et al., (2020)<sup>7</sup>Cahyana & Permadi, (2018); <sup>8</sup>Riandy et al., (2018); <sup>9</sup>Hasrul et al., (2018); <sup>10</sup>Apriliani et al., (2019); <sup>11</sup>Setyaningtyas & Dwiasi, (2012); <sup>12</sup>Chuang et al., (2013); <sup>13</sup>Pontas & Muslim, (2015); <sup>14</sup>Yuningrat et al., (2012); <sup>15</sup>Marhaini & Wibowo, (2016); <sup>16</sup>Ristiawan & Syafila, (2015); <sup>17</sup>Fadiyah et al., (2017); <sup>18</sup>Ayuningtyas, (2020); <sup>19</sup>Enjarlis & Hardi, (2010); <sup>20</sup>Fauzi & R., (2018); <sup>21</sup>Dewi & Wardiyati, (2015); <sup>22</sup>Agustina et al., (2016); <sup>23</sup>Wardiyati et al., (2012); <sup>24</sup>Lesa et al., (2020); <sup>25</sup>Priyadi & J. A. R., (2019); <sup>26</sup>Putri et al., (2020)

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat disimpulkan bahwa sistem AOPs digunakan untuk mengolah limbah yang mayoritas merupakan limbah industri. Selain itu, dapat juga mengolah lindi, limbah rumah sakit, dan lain lain. Semua limbah tersebut memiliki karakteristik yang hampir sama yaitu memiliki kandungan senyawa organik yang tinggi dan sukar didegradasi serta mengandung polutan berbahaya yang tidak dapat secara maksimal diolah dengan pengolahan limbah konvensional. Namun, karena membutuhkan biaya yang tinggi dalam penerapannya, biasanya sistem AOPs ini ditempatkan sebagai *pre-treatment* untuk membantu memudahkan pengolahan biologis atau sebagai *post-treatment* untuk mengolah limbah yang tidak dapat diolah dengan pengolahan biologis.

Selain itu, diketahui pula mekanisme proses pada masing masing sistem AOPs yang dapat dilihat pada tabel 4.2

**Tabel 4. 2 Mekanisme Proses pada Sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia**

No	Sistem AOPs	Mekanisme Proses
1	Sonochemical	$H_2O \xrightarrow{+} H^* + ^*OH$ (Torres-Palma & Serna-Galvis, 2018)
2	Fenton	$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + ^*OH + OH^-$ (Darmadi, 2014) Polutan Organik + $^*OH \rightarrow$ Produk yang terdegradasi (Darmadi, 2014)
3	Peroxymonosulfate/ Katalis	$S_2O_8^{2-} + photon \rightarrow 2 SO_4^{*-}$ $HSO_5^- + photon \rightarrow SO_4^{*-} + ^*OH$ $H_2O + photon \rightarrow ^*H + ^*OH$ $S_2O_8^{2-} + ^*H \rightarrow SO_4^{*-} + SO_4^{2-} + H^+$ $HSO_5^- + ^*H \rightarrow SO_4^{*-} + H_2O$ (Priyadarshini et al., 2022)
4	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$H_2O_2 + hv \rightarrow 2 ^*OH$ (Mierzwa et al., 2018)
5	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	$TiO_2 + hv \rightarrow e_{cb}^- + h_{vb}^+$ $H_2O_2 + e_{cb}^- \rightarrow ^*OH + nOH^-$ (Yuningrat et al., 2012)
6	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$H_2O_2 + 2O_3 \rightarrow ^*OH + ^*OH + 3O_2$ (Ikehata & Li, 2018)
7	O <sub>3</sub> /GAC	1. Dekomposisi homogen (ozon) 2. Dekomposisi heterogen pada permukaan karbon aktif 3. Reaksi propagasi dan terminasi homogen

No	Sistem AOPs	Mekanisme Proses
		(Enjarlis & Hardi, 2010)
8	UV/Fenton/Katalis	$H_2O_2 + hv \rightarrow \cdot OH$ $TiO_2 + hv \rightarrow e^-_{cb} + h^+_{vb}$ $e^- + O_2 \rightarrow O_2^-$ $h^+ + O_2 \rightarrow \cdot OH$ $H_2O_2 + Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + \cdot OH$ $H_2O_2 + Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+} + \cdot OH + OH^-$ (Fauzi & R., 2018)
9	Fotofenton	$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + \cdot OH$ $Fe^{3+} + H_2O + hv \rightarrow Fe^{2+} + H^+ + \cdot OH$ (Wardiyati et al., 2012)
10	Elektrofenton	$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$ $Fe^{2+} + H_2O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O + \cdot OH$ $\cdot OH + Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + OH^-$ $\cdot OH + \text{senyawa organik} \rightarrow \text{produk akhir}$ (Paramo-Vargas et al., 2015)

Berdasarkan Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa inti dari mekanisme proses AOPs yaitu menghasilkan radikal bebas yang cukup untuk mendegradasi dan memineralisasi kontaminan pada limbah. Perbedaan masing masing sistem hanya terletak pada cara menghasilkan radikal bebas tersebut. Ada yang dengan mereaksikan dengan gelombang ultrasonik, ada yang mereaksikan hidrogen peroksida dengan sinar uv dan lain lain. Jenis radikal bebas yang dihasilkan pada umumnya adalah radikal hidroksil yang memiliki potensi oksidasi sebesar 2,8 V. Akan tetapi, jenis radikal lain juga sudah mulai banyak digunakan yaitu berupa radikal sulfat yang memiliki potensi oksidasi yang lebih tinggi yaitu sekitar 2,5-3,1 V.

## 4.2 Kinerja sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia

Kinerja masing- masing sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia dalam menurunkan pencemar sebagai berikut :

### 4.2.1 Sonochemical

Kinerja *Sonochemical* dipengaruhi oleh beberapa parameter. Pada penelitian yang dilakukan oleh Kusuma et al. (2017), parameter yang diteliti berupa pH, konsentrasi hidrogen peroksida dan waktu reaksi. Dari penelitian tersebut, didapatkan hasil sebagai berikut:

- pH dan waktu reaksi memiliki pengaruh negatif terhadap kinerja *sonochemical* dalam menurunkan COD, sehingga semakin tinggi pH dan waktu reaksi akan mengurangi persentase penyisihan COD
- Konsentrasi hidrogen peroksida memiliki pengaruh positif terhadap kinerja *sonochemical* dalam menurunkan COD, sehingga semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida akan menambah persentase penyisihan COD
- Kondisi optimum metode *sonochemical* yaitu pada pH 2 dengan konsentrasi hidrogen peroksida 500 ppm dan waktu reaksi selama 119,98 menit
- Pada kondisi optimum itu, dapat menurunkan COD sebesar 81,88%

#### 4.2.2 Fenton

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem Fenton dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.3.

**Tabel 4. 3 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem Fenton**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	Fenton	Limbah Cair Industri Pupuk Urea	Fe <sup>2+</sup> = 500 ppm; pH = 5 ; waktu kontak = 2 jam	Efisiensi penyisihan Urea berdasarkan variasi konsentrasi hidrogen peroksida: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3000 ppm = 72,8%</li> <li>▪ 4000 ppm = 82,7 %</li> <li>▪ 5000 ppm = 91,8%</li> <li>▪ 6000 ppm = 94,45%</li> <li>▪ 8000 ppm = 100%</li> </ul>	Darmadi, (2014)
2	Fenton	Limbah Cair Penyamakan Kulit	Kondisi optimum: pH = 4; Konsentrasi FeSO <sub>4</sub> = 0,2% ; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> sebesar 120 ppm	Efisiensi penyisihan COD = 34%	Sholeh et al., (2013)
3	Fenton dengan desain <i>Box- Behnken</i>	Limbah Cair Industri Kelapa Sawit	Kondisi optimum: pH = 3; Konsentrasi FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O = 3703,52 ppm; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 5586,43 ppm	Efisiensi penyisihan COD = 70,77044% Efisiensi penyisihan TSS = 88,3897%	Yulia et al. (2016)
4	Fenton	Limbah Cair Domestik	Fe = 35,36 mg/L	Efisiensi penyisihan COD dengan variasi konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5,2 mM = 72,3%</li> <li>▪ 10,4 mM = 68,6%</li> <li>▪ 15,6 mM = 82,31%</li> <li>▪ 20,8 mM = 67,1%</li> <li>▪ 26 mM = 65,9%</li> </ul>	Elfiana et al., (2013)
5	Fenton	Limbah Cair Rumah Sakit	Rasio COD/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 10 (g/g); Fe <sup>2+</sup> = 200 mg/L; Waktu kontak = 30 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi pH : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3 = 55,07%</li> <li>▪ 5 = 46,33%</li> <li>▪ 7,2 = 40%</li> </ul>	Setiawan et al. (2020)
			pH = 7; Fe <sup>2+</sup> = 200 mg/L; Waktu kontak = 30 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi rasio COD/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2,125 (g/g) = 36,67%</li> <li>▪ 10 (g/g) = 40 %</li> <li>▪ 20 (g/g) = 15%</li> </ul>	

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
6	Fenton	Limbah Cair Laboratorium	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 20%; pH = 3; waktu reaksi = 1 jam	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan dosis fenton: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 : 100 = 47,89%</li> <li>▪ 1 : 200 = 56,34%</li> <li>▪ 1 : 300 = 83,10%</li> <li>▪ 1 : 400 = 71,83%</li> </ul>	Cahyana & Permadi, (2018)

Berdasarkan Tabel 4.3, dapat diketahui bahwa

- Konsentrasi hidrogen peroksida mempengaruhi kemampuan degradasi urea. Semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida, maka semakin tinggi pula kemampuan dalam degradasi urea. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida, maka semakin banyak radikal hidroksil yang dihasilkan sehingga kemampuan dekomposisi urea pun semakin tinggi.
- Kemampuan degradasi COD dan TSS oleh fenton dipengaruhi oleh pH, konsentrasi hidrogen peroksida dan konsentrasi FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O. Kemampuan degradasi COD dan TSS akan maksimal ketika kondisi optimum. Kondisi optimum metode fenton pada pengolahan limbah cair industri penyamakan kulit yaitu pH 4, Konsentrasi FeSO<sub>4</sub> sebesar 0,2% dan konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 120 ppm. Pada kondisi tersebut, persentase efisiensi penyisihan COD sebesar 34% . Sedangkan kondisi optimum metode fenton pada pengolahan limbah cair kelapa sawit yaitu pada pH 3, Konsentrasi FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O sebesar 3703,52 ppm dan konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 5586,43 ppm. Pada kondisi tersebut, persentase efisiensi penyisihan COD sebesar 70,77044% dan efisiensi penyisihan TSS sebesar 88,3897%.
- Persentase penyisihan COD dipengaruhi oleh konsentrasi hidrogen peroksida atau COD/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, namun perlu diperhatikan jumlah yang ditambahkan karena jika berlebihan akan menurunkan kemampuan degradasi karena radikal hidroksil akan bereaksi dengan hidrogen peroksida dan menghasilkan radikal yang kurang reaktif. Sedangkan jika terlalu sedikit akan menyebabkan kurangnya kebutuhan radikal hidroksil sehingga kemampuan degradasinya tidak maksimal.
- Persentase penyisihan COD dipengaruhi oleh pH. Pada penelitian yang dilakukan oleh Setiawan et al. (2020) terlihat bahwa persentase COD paling tinggi pada kondisi pH 3. Hal tersebut terjadi karena pada pH rendah terdapat proton yang akan dikonsumsi oleh oksigen dan menghasilkan hidrogen peroksida sehingga jumlah hidrogen peroksida semakin banyak dan semakin memperbanyak radikal hidroksil yang akan mendegradasi COD. Pada pH yang tinggi, persentase penyisihan COD menurun dikarenakan pada kondisi ini terjadi dekomposisi hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen, penonaktifan ion besi menjadi kompleks hidrokso besi dan penurunan potensi radikal hidroksil. Akan tetapi pH terlalu rendah juga tidak dianjurkan karena H<sup>+</sup> yang terdapat pada kondisi tersebut sangat tinggi yang cenderung beraksi dengan radikal hidroksil dan akan mengakibatkan kemampuan penyisihan COD menurun.
- Persentase penyisihan COD juga dipengaruhi oleh dosis fenton, semakin besar dosis fenton maka semakin besar pula persentase penyisihan COD. Namun hal itu hanya berlaku sampai mencapai dosis optimum. Setelah melewati dosis optimum, penyisihan COD akan menurun karena konsentrasi radikal hidroksil sudah jenuh dalam mengoksidasi pereaksi fenton terdeteksi sebagai pencemar yang menaikkan konsentrasi COD dalam limbah.

### 4.2.3 Peroxymonosulfate/Katalis

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem *Peroxymonosulfate/Katalis* dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.4.

**Tabel 4. 4 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem *Peroxymonosulfate/Katalis***

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	<i>Peroxymonosulfate/</i> Katalis $\text{LaMnO}_3$ <i>Perovskite</i>	Limbah Cair Industri Kelapa Sawit	PMS = 2 g/L ; Konsentrasi katalis = 0,4 g/L; Waktu reaksi = 120 menit ; Suhu = 30°C, pH = 8, kecepatan pengadukan = 400 rpm	Efisiensi penyisihan COD = 80,5%	Riandy et al., (2018)
2	<i>Peroxymonosulfate/</i> Katalis $\text{LaMnO}_3$ <i>Perovskite</i>	Limbah Cair Industri Kelapa Sawit	PMS = 0,8 g/L ; Konsentrasi katalis = 0,4 g/L; Waktu reaksi = 120 menit ; Suhu = 30°C, pH = 8, kecepatan pengadukan = 400 rpm	Efisiensi penyisihan COD = 63,54%	Hasrul et al., (2018)
3	<i>Peroxymonosulfate/</i> Katalis <i>nitrogen-</i> <i>doped three-</i> <i>dimensional carbon</i> <i>framework (3D</i> <i>NCF).</i>	Limbah Cair Industri Pulp dan Kertas	PMS = 2 g/L ; Suhu = 30° C ; Waktu reaksi = 120 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi konsentrasi katalis: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 g/L = 20,68%</li> <li>▪ 0,1 g/L = 76,44%</li> <li>▪ 0,2 g/L = 86,04%</li> <li>▪ 0,3 g/L = 87,35%</li> <li>▪ 0,4 g/L = 88,22%</li> </ul>	Apriliani et al., (2019)

Berdasarkan Tabel 4.4, dapat diketahui bahwa

- Efisiensi penyisihan COD dapat dipengaruhi oleh konsentrasi katalis dan konsentrasi PMS. Semakin besar konsentrasi katalis yang ditambahkan, akan semakin tinggi efisiensi penyisihan COD pada limbah begitu pula dengan konsentrasi PMS. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi konsentrasi katalis akan menyebabkan sisi aktif katalis lebih banyak sehingga akan meningkatkan laju reaksi aktivasi PMS yang akan



menghasilkan sulfat radikal dan juga semakin banyak konsentrasi PMS akan menghasilkan semakin banyak sulfat radikal. Semakin banyak sulfat radikal yang dihasilkan maka semakin tinggi pula persentase efisiensi penurunan COD.

#### 4.2.4 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.5.

**Tabel 4.5 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Limbah Cair Industri Mie	Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0,01 M	<p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 = 67%</li> <li>▪ 5 = 58%</li> <li>▪ 7 = 20%</li> <li>▪ 9 = 22%</li> <li>▪ 12 = 8%</li> </ul> <p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi waktu kontak:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 jam = 30%</li> <li>▪ 2 jam = 38%</li> <li>▪ 3 jam = 42%</li> <li>▪ 4 jam = 45%</li> </ul>	Setyaningtyas & Dwiasi, (2012)
			Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0,02 M	<p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 = 62%</li> <li>▪ 5 = 56 %</li> <li>▪ 7 = 25%</li> <li>▪ 9 = 28%</li> <li>▪ 12 = 7%</li> </ul> <p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi waktu kontak:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 jam = 30%</li> <li>▪ 2 jam = 36%</li> <li>▪ 3 jam = 40%</li> <li>▪ 4 jam = 42%</li> </ul>	
			Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0,03 M	<p>Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 = 69%</li> <li>▪ 5 = 50%</li> <li>▪ 7 = 19%</li> <li>▪ 9 = 17%</li> <li>▪ 12 = 10%</li> </ul>	

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				Kemampuan degradasi tartrazin berdasarkan variasi waktu kontak: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 jam = 43%</li> <li>▪ 2 jam = 44%</li> <li>▪ 3 jam = 42%</li> <li>▪ 4 jam = 39%</li> </ul>	
2	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Limbah Cair Industri Eleokimia	Waktu reaksi = 60 menit	Kemampuan degradasi COD dengan variasi konsentrasi hidrogen peroksida : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 25 mL = 71,56 %</li> <li>▪ 50 mL = 72,1 %</li> <li>▪ 75 mL = 70,39%</li> <li>▪ 100 mL = 76,78%</li> </ul> Kemampuan degradasi TSS dengan variasi konsentrasi hidrogen peroksida : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 25 mL = 22,14 %</li> <li>▪ 50 mL = 40,48 %</li> <li>▪ 75 mL = 29,05 %</li> <li>▪ 100 mL = 46,19%</li> </ul>	Chuang et al., (2013)
3	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Limbah Cair Industri Tahu	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30%) = 20 mL; Suhu = 30°C	Efisiensi penyisihan COD dengan variasi waktu reaksi <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 50 menit = 7,07%</li> <li>▪ 100 menit = 18,44%</li> <li>▪ 150 menit = 23,19%</li> <li>▪ 200 menit = 28,87%</li> <li>▪ 250 menit = 33,62%</li> </ul>	Pontas & Muslim, (2015)

Berdasarkan Tabel 4.5, dapat diketahui bahwa

- Hubungan antara pH dengan kemampuan degradasi tartrazin berkorelasi negatif yang artinya semakin rendah pH maka kemampuan degradasi tartrazin menjadi semakin tinggi. Hal tersebut terjadi karena pada kondisi asam, radikal hidroksil yang dihasilkan oleh sistem ini akan meningkat karena semakin banyaknya ion H<sup>+</sup>. Selain itu, pada kondisi pH tinggi menghambat pembentukan radikal hidroksil yang sebagian besar berasal dari hidrogen peroksida sehingga pembentukan radikal hidroksil lebih sedikit.
- Degradasi tartrazin tidak dipengaruhi oleh konsentrasi hidrogen peroksida. Akan tetapi, konsentrasi hidrogen peroksida mempengaruhi waktu kesetimbangan. Semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida, maka akan semakin cepat waktu kesetimbangan

tercapai. Waktu kesetimbangan adalah waktu dimana tingkat degradasi tartrazin tidak akan meningkat secara signifikan atau berjalan hampir stagnan.

- Degradasi COD dan TSS dipengaruhi oleh konsentrasi hidrogen peroksida. Semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida, maka akan semakin tinggi pula kemampuan degradasi COD dan TSS. Hal tersebut terjadi karena reaksi pembentukan radikal hidroksil semakin cepat sehingga radikal hidroksil yang terbentuk semakin banyak.
- Semakin lama waktu reaksi akan semakin tinggi pula besar persentase penyisihan COD. Hal tersebut terjadi karena semakin lama waktu reaksi maka akan semakin banyak pula radikal hidroksil yang dihasilkan sehingga kemampuan degradasinya pun meningkat.

#### 4.2.5 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.6.

**Tabel 4. 6 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	Lindi	pH = 8 ; TiO <sub>2</sub> = 1 g/L	Efisiensi penyisihan BOD berdasarkan variasi Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 mL/L = 39%</li> <li>▪ 14 mL/L = 35 %</li> </ul> Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 mL/L = 35 %</li> <li>▪ 14 mL/L = 50%</li> </ul>	Yuningrat et al., (2012)
2	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	Limbah cair Industri Batubara	Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 30% ; Waktu reaksi = 1 jam	Efisiensi penyisihan Fe berdasarkan pH : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 45%</li> <li>▪ 6 = 47%</li> <li>▪ 7 = 49%</li> </ul> Efisiensi penyisihan Hg berdasarkan pH : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 26%</li> <li>▪ 6 = 43%</li> <li>▪ 7 = 60%</li> </ul>	Marhaini & Wibowo, (2016)

Berdasarkan Tabel 4.6, dapat diketahui bahwa

- Konsentrasi hidrogen peroksida berpengaruh terhadap efisiensi penurunan BOD dan COD. Semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida maka semakin tinggi pula efisiensi penurunan BOD dan COD. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi konsentrasi hidrogen peroksida maka semakin banyak radikal hidroksil yang terbentuk sehingga kemampuan degradasinya semakin baik.
- pH berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan logam Fe dan Hg. pH optimum pada penelitian yang dilakukan oleh Marhaini & Wibowo (2016) adalah 7, Hal tersebut dikarenakan pada kondisi pH 7, oksidator hidrogen peroksida terpecah menjadi H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> dan mudah terdekomposisi menjadi oksigen dan air.

#### 4.2.6 O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.7.

**Tabel 4. 7 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Industri Pulp dan Kertas	Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 17 %</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 23%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik = 27,9 %</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 69 %</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 72%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik = 80%</li> </ul>	Ristiawan & Syafila, (2015)
			Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 1000 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 14,9 %</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 28,1%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =24,5 %</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 73,4%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 88 %</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =82,1%</li> </ul>	
			Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 1500 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 8,5%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 22,5%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =17,5%</li> </ul> Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 72,1%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 88%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =81,2%</li> </ul>	
			Waktu kontak = 2 jam; Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 2000 mg/L ; pH = 7-8	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 13,5%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 12,5%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =4,6%</li> </ul>	

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				Efisiensi penyisihan Lignin berdasarkan variasi <i>feeding rate</i> ozon : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13,3 ppm/detik = 68,5%</li> <li>▪ 26,7 ppm/detik = 87%</li> <li>▪ 40 ppm/ detik =75%</li> </ul>	
2	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Lindi	Waktu kontak = 180 menit	Nilai pH berdasarkan variasi debit udara: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2L/ menit =9,3</li> <li>▪ 3L/menit = 9,25</li> <li>▪ 4L/menit = 9,2</li> </ul> Efisiensi Kekeruhan berdasarkan variasi debit udara: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2L/ menit =22,49%</li> <li>▪ 3L/menit = 35,67%</li> <li>▪ 4L/menit = 45,15%</li> </ul> Efisiensi DHL berdasarkan variasi debit udara: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2L/ menit =10%</li> <li>▪ 3L/menit = 14,33%</li> <li>▪ 4L/menit = 15%</li> </ul>	Fadiyah et al., (2017)

Berdasarkan Tabel 4.7, dapat diketahui bahwa

- Efisiensi penurunan COD dan Lignin dipengaruhi oleh konsentrasi hidrogen peroksida. Penambahan hidrogen peroksida dapat meningkatkan efisiensi penurunan lignin namun akan terjadi penurunan pada konsentrasi tertentu dikarenakan apabila hidrogen peroksida berlebih akan menjadi *free radical scavenger* sehingga akan menurunkan konsentrasi radikal dan menghambat penyisihan lignin.
- Kondisi optimum pada penelitian yang dilakukan oleh Ristiawan & Syafila (2015) yaitu *feeding rate* ozon sebesar 16,7 ppm/detik dengan penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 1000 mg/L. Pada kondisi ini penyisihan COD sebesar 28% dan lignin sebesar 88%.
- Variasi debit udara mempengaruhi nilai pH, efisiensi penyisihan kekeruhan dan efisiensi penyisihan DHL. Semakin tinggi debit udara, nilai pH juga semakin tinggi. pH tinggi mengindikasikan bahwa terdapat banyak OH<sup>-</sup> dalam air limbah yang akan membentuk radikal hidroksil dan proses oksidasi pada AOPs berjalan dengan baik, sehingga efisiensi penyisihan kekeruhan dan DHL meningkat. DHL merupakan kemampuan air dalam menghantarkan arus listrik dan dapat menjadi indikator kehadiran senyawa anorganik (Fadiyah et al., 2017).

#### 4.2.7 O<sub>3</sub>/GAC

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem O<sub>3</sub>/GAC dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.8.

**Tabel 4. 8 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem O<sub>3</sub>/GAC**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	O <sub>3</sub> /GAC	Limbah Cair Industri Batik	Waktu Kontak = 15 menit ; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 98,75%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,53%</li> <li>▪ 1 gr = 99,63%</li> <li>▪ 2 gr = 99,83%</li> </ul> Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 94,75%</li> <li>▪ 0,5 gr = 97,02%</li> <li>▪ 1 gr = 97,52%</li> <li>▪ 2 gr = 97,72%</li> </ul>	Ayuningtyas, (2020)
			Waktu Kontak = 30 menit; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,16%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,69 %</li> <li>▪ 1 gr = 99,72%</li> <li>▪ 2 gr = 99,83%</li> </ul> Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 97,88%</li> <li>▪ 0,5 gr = 98,28%</li> <li>▪ 1 gr = 98,64%</li> <li>▪ 2 gr = 98,74%</li> </ul>	
			Waktu Kontak = 60 menit; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,6%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,86%</li> <li>▪ 1 gr = 99,73%</li> <li>▪ 2 gr = 99,9%</li> </ul> Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 98,99%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,19%</li> <li>▪ 1 gr = 99,44%</li> </ul>	

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 gr = 99,8%</li> </ul>	
			Waktu Kontak = 90 menit; pH =8	Persentase Penyisihan Kadar Warna dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,5%</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,6%</li> <li>▪ 1 gr = 99,8%</li> <li>▪ 2 gr = 99,9%</li> </ul> Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi dosis GAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 gr = 99,09 %</li> <li>▪ 0,5 gr = 99,39%</li> <li>▪ 1 gr = 99,65%</li> <li>▪ 2 gr = 99,8%</li> </ul>	
2	O <sub>3</sub> /GAC	Limbah Cair Industri Tapioka	Waktu kontak = 60 menit; dosis ozon = 0,25 gr/jam	Persentase penyisihan CN dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 90,69 %</li> <li>▪ 7 = 95,34%</li> <li>▪ 9 = 96,27 %</li> </ul> Persentase penyisihan COD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 40,38%</li> <li>▪ 7 = 13,46%</li> <li>▪ 9 = 25 %</li> </ul> Persentase penyisihan BOD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 39,39 %</li> <li>▪ 7 = 18,18%</li> <li>▪ 9 = 27,27 %</li> </ul> Persentase penyisihan TSS dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 20 %</li> <li>▪ 7 = 30 %</li> <li>▪ 9 = 40%</li> </ul>	Enjarlis & Hardi, (2010)
			Waktu kontak = 90 menit; dosis ozon = 0,25 gr/jam	Persentase penyisihan CN dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 92,55 %</li> <li>▪ 7 = 97,2%</li> </ul>	

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 9 = 98,14 %</li> </ul> Persentase penyisihan COD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 71,15 %</li> <li>▪ 7 = 32,7 %</li> <li>▪ 9 = 63,46 %</li> </ul> Persentase penyisihan BOD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 74,24 %</li> <li>▪ 7 = 31,81%</li> <li>▪ 9 = 66,67 %</li> </ul> Persentase penyisihan TSS dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 60 %</li> <li>▪ 7 = 70 %</li> <li>▪ 9 = 80 %</li> </ul>	
			Waktu kontak = 120 menit; dosis ozon = 0,25 gr/jam	Persentase penyisihan CN dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 96,27 %</li> <li>▪ 7 = 98,1%</li> <li>▪ 9 = 98,53 %</li> </ul> Persentase penyisihan COD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 90,69 %</li> <li>▪ 7 = 98,1%</li> <li>▪ 9 = 98,53 %</li> </ul> Persentase penyisihan BOD dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 70,13 %</li> <li>▪ 7 = 73,76 %</li> <li>▪ 9 = 82,42 %</li> </ul> Persentase penyisihan TSS dengan variasi pH <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 = 84 %</li> <li>▪ 7 = 86 %</li> <li>▪ 9 = 90%</li> </ul>	



Berdasarkan Tabel 4.8, dapat diketahui bahwa :

- Waktu kontak dan dosis GAC mempengaruhi besar penyisihan kadar warna dan fenol. Semakin lama waktu kontak, semakin tinggi persentase penyisihan kadar warna dan fenol. Hal tersebut terjadi karena, semakin lama waktu kontak akan membentuk radikal hidroksil dan ozon terlarut yang semakin banyak sehingga persentase penyisihan kadar warna dan fenol akan semakin tinggi. Semakin tinggi dosis GAC, semakin tinggi pula persentase penyisihan kadar warna dan fenol. Hal tersebut karena semakin meningkat massa GAC yang digunakan maka semakin luas permukaan adsorben sehingga semakin banyak zat warna dan fenol yang teradsorpsi.
- Waktu kontak dan pH mempengaruhi besar penyisihan CN, BOD, COD dan TSS. Pengaruh waktu kontak dan pH pada penyisihan CN yaitu berkorelasi positif yang artinya semakin lama waktu kontak dan semakin tinggi pH akan memperbesar kemampuan degradasi CN. Hal tersebut terjadi karena pembentukan radikal hidroksil dan ozon semakin banyak yang disebabkan oleh pH yang semakin tinggi dan waktu kontak yang semakin lama. Penurunan nilai COD dan BOD paling efektif terjadi pada pH 9 dengan waktu kontak paling lama yaitu 120 menit. Penurunan nilai COD dan BOD disebabkan oleh terurainya senyawa glikosida yang mengandung gugus CN oleh ozon, radikal hidroksil dan oksigen yang cukup besar. Penurunan COD dan BOD jauh lebih kecil dibandingkan penurunan CN dikarenakan kandungan dosis ozon yang terlalu kecil dan kandungan limbah yang terlalu tinggi sehingga sistem ini kekurangan jumlah ozon, radikal hidroksil dan oksigen dalam menguraikan senyawa glikosida. Pada penurunan TSS, hubungan antara waktu kontak dan pH terhadap kemampuan degradasi TSS juga berkorelasi positif. Hal tersebut disebabkan penguraian organik melalui sistem ini hanya efektif dalam mengolah kontaminan terlarut, tidak efektif untuk kontaminan bentuk koloid.

#### 4.2.8 UV/Fenton/ Katalis

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem UV/Fenton/TiO<sub>2</sub> dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.9.

**Tabel 4. 9 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem UV/Fenton/TiO<sub>2</sub>**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	UV/Fenton/ TiO <sub>2</sub>	Limbah Cair Industri Batik	Waktu kontak = 120 menit; pH = 5	<p>Efisiensi Penyisihan COD berdasarkan perbandingan rasio molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1= 68,5%</li> <li>▪ 10:0,15= 72,4%</li> <li>▪ 10:0,2= 73%</li> <li>▪ 10:0,25= 83,3%</li> <li>▪ 10:0,3= 69,3%</li> </ul> <p>Efisiensi Penyisihan TSS berdasarkan perbandingan rasio molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1= 73,4%</li> <li>▪ 10:0,15=83,5%</li> <li>▪ 10:0,2= 92%</li> <li>▪ 10:0,25= 92,5%</li> </ul>	Fauzi & R., (2018)

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 :0,3=94,5%</li> </ul> Efisiensi Penyisihan Warna berdasarkan perbandingan rasio molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :FeSO <sub>4</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : 0,1 = 79,9 %</li> <li>▪ 10:0,15 = 68%</li> <li>▪ 10:0,2 = 60%</li> <li>▪ 10:0,25 = 84,6%</li> <li>▪ 10 :0, 3 = 58,7 %</li> </ul>	
2	UV/Fenton/ /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	Limbah cair industri batik	pH = 5-7; waktu radiasi = 150 menit; Jumlah H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 25μL, jumlah katalis = 50 mg/50 mL limbah	Efisiensi penurunan warna merah = 94,5%	Dewi & Wardiyati, (2015)
3	UV/Fenton/ TiO <sub>2</sub>	Limbah Tekstil	Konsentrasi limbah = 250 ppm	Efisiensi Penyisihan Warna berdasarkan konsentrasi katalis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0,05%=98%</li> <li>▪ 0,1%=98%</li> <li>▪ 0,2%=100%</li> <li>▪ 0,4%=100%</li> </ul> Efisiensi Penyisihan COD berdasarkan konsentrasi katalis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0,05% = 74,5%</li> <li>▪ 0,1% = 78,9%</li> <li>▪ 0,2% = 82,6%</li> <li>▪ 0,4% = 92%</li> </ul>	Agustina et al., (2016)

Berdasarkan Tabel 4.9, dapat diketahui bahwa :

- Perbandingan rasio molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub> akan mempengaruhi besar efisiensi penyisihan COD. Pada perbandingan rasio molar 10:0,1 dan 10:0,15 mempunyai kemampuan degradasi yang cukup rendah dikarenakan hidrogen peroksida dalam sistem masih tinggi. Hidrogen peroksida yang tinggi atau berlebihan akan menurunkan kemampuan degradasi karena radikal hidroksil akan bereaksi dengan hidrogen peroksida dan menghasilkan radikal yang kurang reaktif. Pada perbandingan rasio molar 10:0,3 juga memiliki persentase penyisihan yang kecil karena pada kondisi ini terdapat terlalu banyak FeSO<sub>4</sub> di dalam sistem sehingga menghasilkan ion Fe<sup>2+</sup> berlebih yang akan bereaksi dengan radikal hidroksil. Hal tersebut akan mengurangi jumlah radikal hidroksil yang ada sehingga persentasenya menurun. Sedangkan pada rasio molar 10:0,25 mempunyai kemampuan degradasi yang paling tinggi yang artinya pada kondisi ini sistem akan bekerja maksimal. Kondisi ini dapat dikatakan sebagai kondisi seimbang (Fauzi & R., 2018).

- Perbandingan rasio molar  $H_2O_2:FeSO_4$  akan mempengaruhi besar efisiensi penyisihan TSS. Perbandingan molar 10:0,3 memiliki persentase penyisihan TSS yang paling tinggi karena tingginya ion Fe yang ditambahkan ke dalam sistem sehingga terbentuk ion  $Fe^{2+}$  dan  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  akan bereaksi dengan radikal hidroksil sehingga semakin banyak  $Fe^{2+}$  yang bereaksi akan semakin tinggi persentase penyisihannya. Kondisi yang memiliki persentase penyisihan TSS terkecil yaitu pada perbandingan rasio molar 10:0,1 karena penyisihan TSS pada kondisi ini berjalan secara bertahap akibat kurangnya ion Fe (Fauzi & R., 2018).
- Perbandingan rasio molar  $H_2O_2:FeSO_4$  akan mempengaruhi besar efisiensi penyisihan warna. Pada perbandingan 10:0,1 terjadi *self saving* OH akibat kurangnya ion Fe sehingga persentase penyisihan warna rendah. Namun apabila perbandingan rasio molarnya terlalu tinggi seperti 10:0,3 akan menyebabkan ion besi terlarut dan akan menurunkan persentase penyisihan warna. Penyisihan warna paling tinggi terjadi pada rasio molar 10: 0,25, sehingga kondisi ini dianggap sebagai kondisi seimbang, tidak terlalu tinggi dan tidak terlalu rendah (Fauzi & R., 2018).
- Menurut Dewi & Wardiyati (2015), persentase penyisihan warna dipengaruhi oleh pH, waktu radiasi, jumlah katalis dan jenis katalis. pH optimum pada penelitian ini yaitu 5-7, hal itu disebabkan karena pada pH asam komposit magnetik katalis tidak stabil dan akan bereaksi dengan asam di sekitarnya dan mengakibatkan jumlah  $Fe_3O_4$  berkurang sehingga efisiensi degradasi warna rendah. Waktu radiasi optimum pada penelitian ini yaitu 150 menit karena peningkatan degradasi warna secara signifikan hanya sampai menit 150 menit, walaupun setelah itu degradasi warna juga tetap meningkat namun tidak signifikan dan cenderung konstan. Jumlah katalis optimum pada penelitian ini yaitu 50 mg/50 mL limbah karena peningkatan degradasi warna secara signifikan seiring dengan peningkatan konsentrasi katalis hanya berlaku hingga konsentrasi katalis sebesar 50 mg/50 mL limbah, setelah itu tidak meningkat secara signifikan bahkan jika diatas 100 mg/50 mL limbah mengalami penurunan kemampuan degradasi warna (Dewi & Wardiyati, 2015).
- Besarnya konsentrasi katalis akan mempengaruhi besar efisiensi penyisihan COD dan warna. Semakin tinggi konsentrasi katalis akan semakin besar juga efisiensi penyisihan COD dan warna. Hal itu terjadi karena semakin banyak katalis yang terkena UV maka akan semakin banyak radikal hidroksil yang terbentuk yang akan mendegradasi COD dan warna. Selain itu juga karena semakin tinggi konsentrasi katalis maka daerah permukaan katalis yang berfungsi untuk menyerap sinar UV akan semakin besar sehingga radikal hidroksil yang terbentuk pun semakin banyak (Agustina et al., 2016).

#### 4.2.9 Fotofenton

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem fotofenton dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.10.

**Tabel 4. 10 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem Fotofenton**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	Fotofenton	Limbah Cair Industri Batik	Waktu kontak = 15 menit ; pH =3	Efisiensi degradasi warna ketika konsentrasi $FeSO_4.H_2O_2$ 25 g dan konsentrasi $H_2O_2$ 25 $\mu$ L = 98,5%	Wardiyati et al., (2012)

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				Efisiensi degradasi warna ketika konsentrasi $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$ 125 g dan konsentrasi $\text{H}_2\text{O}_2$ 125 $\mu\text{L}$ = 95,5%	
2	Fotofenton	Lindi	Panjang gelombang = 254 nm; Waktu reaksi = 120 menit; pH = 3; Debit aliran = 0,6 L/s	<p>Penyisihan TSS berdasarkan perbandingan <math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 70%</li> <li>▪ 10:0,15 = 81,9%</li> <li>▪ 10:0,2 = 82,4 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 84,5%</li> <li>▪ 10:0,3 = 91%</li> </ul> <p>Penyisihan COD berdasarkan perbandingan <math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 35%</li> <li>▪ 10:0,15 = 63%</li> <li>▪ 10:0,2 = 64 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 65%</li> <li>▪ 10:0,3 = 87%</li> </ul> <p>Penyisihan BOD berdasarkan perbandingan <math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 38%</li> <li>▪ 10:0,15 = 39%</li> <li>▪ 10:0,2 = 45%</li> <li>▪ 10:0,25 = 59%</li> <li>▪ 10:0,3 = 70%</li> </ul> <p>Penyisihan <math>\text{PO}_4</math> berdasarkan perbandingan <math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 30%</li> <li>▪ 10:0,15 = 43%</li> <li>▪ 10:0,2 = 52 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 59 %</li> <li>▪ 10:0,3 = 65%</li> </ul> <p>Penyisihan Total N berdasarkan perbandingan <math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4</math> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,1 = 49%</li> <li>▪ 10:0,15 = 55%</li> </ul>	Lesa et al., (2020)

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10:0,2 = 68 %</li> <li>▪ 10:0,25 = 70 %</li> <li>▪ 10:0,3 = 79%</li> </ul>	

Berdasarkan Tabel 4.10, dapat diketahui bahwa

- Konsentrasi  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$  dan konsentrasi  $\text{H}_2\text{O}_2$  mempengaruhi kinerja sistem fotofenton dalam mendegradasikan warna. Semakin tinggi Konsentrasi  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$  dan konsentrasi  $\text{H}_2\text{O}_2$ , tidak selalu memberikan efisiensi degradasi warna yang semakin tinggi. Hal tersebut terjadi karena jika konsentrasi  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$  dan konsentrasi  $\text{H}_2\text{O}_2$  berlebih, akan menambah jumlah endapan ferri hidroksida yang terbentuk pada proses fotofenton dan mengakibatkan pembentukan radikal hidroksil terganggu sehingga kemampuan degradasi warna berkurang.
- Perbandingan molar  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4$  mempengaruhi kemampuan penyisihan TSS, COD, BOD,  $\text{PO}_4$  dan Total N. Semakin tinggi perbandingan molar  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4$  maka semakin tinggi pula kemampuan penyisihan TSS, COD, BOD,  $\text{PO}_4$  dan Total N. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi perbandingan molar  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{FeSO}_4$ , semakin banyak  $\text{FeSO}_4$  yang bereaksi dengan  $\text{H}_2\text{O}_2$  maka radikal hidroksil yang dihasilkan semakin banyak dan meningkatkan efisiensi pengolahan.

#### 4.2.10 Elektrofenton

Kinerja metode *Advanced Oxidation Process* dengan sistem elektrofenton dari beberapa literatur dapat dilihat pada tabel 4.11.

**Tabel 4. 11 Kinerja Metode *Advanced Oxidation Process* dengan Sistem Elektrofenton**

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
1	Elektrofenton	Limbah Cair Industri Tekstil	Perbandingan molaritas $\text{H}_2\text{O}_2$ : $\text{FeSO}_4$ = 10:0,2 ; pH =4 ; Waktu kontak = 180 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan tegangan listrik dan jarak elektroda : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 6 volt, 2 cm = 92,9%</li> <li>▪ 7 volt, 4 cm = 89,8 %</li> <li>▪ 8 volt, 6 cm = 88,4%</li> </ul> Efisiensi penyisihan Warna berdasarkan tegangan listrik dan jarak elektroda : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 6 volt, 2 cm = 98,9%</li> <li>▪ 7 volt, 4 cm = 85,7 %</li> </ul>	Priyadi & J. A. R., (2019)

No	Sistem AOPs	Jenis Limbah	Kondisi Proses	Hasil	Sumber
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 8 volt, 6 cm = 99,5%</li> </ul>	
			Tegangan listrik =7 volt; jarak elektroda = 4 cm; pH =4 ; Waktu kontak = 180 menit	Efisiensi penyisihan COD berdasarkan Perbandingan molaritas H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : FeSO <sub>4</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : 0,1 = 94,1 %</li> <li>▪ 10 : 0,2 = 88,7%</li> <li>▪ 10 : 0,3 = 73%</li> </ul> Efisiensi penyisihan warna berdasarkan Perbandingan molaritas H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : FeSO <sub>4</sub> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : 0,1 = 99,2%</li> <li>▪ 10 : 0,2 = 85,1%</li> <li>▪ 10 : 0,3 = 72,3%</li> </ul>	
2	Elektrofenton	Limbah Cair Rumah Sakit	pH =4; jarak elektroda = 4 cm; waktu kontak = 60 menit ; tegangan = 4 volt	Efisiensi penurunan COD berdasarkan rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :COD (g/g) : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2,125 = 47,78%</li> <li>▪ 10 = 89,29%</li> <li>▪ 19,16 = 58,23%</li> </ul>	Putri et al., (2020)
			pH =4; jarak elektroda = 4 cm; waktu kontak = 60 menit ; rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :COD (g/g) = 10	Efisiensi penurunan COD berdasarkan tegangan : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3 volt = 73,03%</li> <li>▪ 4 volt = 89,29%</li> <li>▪ 5 volt = 80,39%</li> </ul>	

Berdasarkan Tabel 4.11, dapat diketahui bahwa

- Tegangan listrik, jarak elektroda dan perbandingan molaritas H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:FeSO<sub>4</sub> mempengaruhi kemampuan sistem dalam mendegradasi COD dan zat warna. Semakin

besar tegangan listrik dan semakin panjang jarak elektroda akan semakin menurunkan kemampuan degradasi COD dan zat warna. Hal itu terjadi karena semakin panjang jarak elektroda maka semakin lemah kuat arus listrik mengakibatkan hidrogen peroksida yang terbentuk pun semakin sedikit sehingga kemampuan degradasi COD dan zat warna menurun. Dan juga, semakin besar perbandingan molaritas  $H_2O_2:FeSO_4$ , semakin kecil kemampuan degradasi COD dan warna. Hal tersebut terjadi karena ion besi terlarut, reagen fenton tidak stabil sehingga muncul endapan yang akan mengganggu proses elektrofenton dan menurunkan kemampuan degradasi COD dan warna.

- Konsentrasi  $H_2O_2$  mempengaruhi kemampuan degradasi COD pada sistem tetapi perlu diperhatikan jumlah  $H_2O_2$  yang ditambahkan karena jika terlalu sedikit akan menyebabkan kurangnya kebutuhan radikal hidroksil sehingga kemampuan degradasinya tidak maksimal dan jika terlalu banyak, akan mengganggu proses analisis COD karena sisa  $H_2O_2$  bereaksi dengan  $K_2Cr_2O_7$  dan mengakibatkan meningkatnya senyawa organik pada limbah. Selain itu penggunaan  $H_2O_2$  berlebih akan menambah biaya pengolahannya.
- Peningkatan efisiensi degradasi COD pada tegangan 3 volt menuju 4 volt karena peningkatan tegangan akan berpengaruh terhadap katalis, katalis akan mengalami oksidasi dan mengakibatkan  $Fe^{2+}$  teroksidasi menjadi  $Fe^{3+}$  sehingga pembentukan  $Fe(OH)_3$  semakin banyak yang membuat proses reduksi senyawa organik pada limbah pun semakin besar. Namun hal itu tidak berlaku pada tegangan 4 volt menuju 5 volt. Hal tersebut terjadi karena semakin meningkat tegangan tentu akan semakin tinggi pembentukan hidrogen peroksida dan apabila hidrogen peroksida habis bereaksi sebelum habis waktu prosesnya maka radikal hidroksil akan sulit terbentuk sehingga penurunan COD kurang optimal.

Kemudian, kemampuan degradasi pencemar oleh masing-masing sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia dirangkum pada Tabel 4.12.

**Tabel 4. 12 Kemampuan Degradasi Pencemar oleh Masing-masing Sistem AOPs**

Jenis Pencemar	Sistem AOPs									
	Sonochemical	Fenton	Peroxymonosulfate/ Katalis	UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / TiO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub> / GAC	UV/ Fenton/ Katalis	Fotofenton	Elektrofenton
COD	81,88% <sup>1</sup>	34–83,10% <sup>3,4,5,6,7</sup>	20,68 – 88,22% <sup>8,9,10</sup>	70,39 – 76,78% <sup>12,13</sup>	35 – 50% <sup>14</sup>	4,6 – 28,1% <sup>16</sup>	13,46 – 98,53% <sup>19</sup>	68,5 – 92% <sup>20,22</sup>	35 – 87% <sup>24</sup>	47,78 – 94,1% <sup>25,26</sup>
BOD					35 – 39% <sup>14</sup>		18,18 – 82,42% <sup>19</sup>		38 – 70% <sup>24</sup>	
TSS		88,39% <sup>4</sup>		22,4 – 46,19% <sup>12</sup>				70 – 91% <sup>20</sup>		
Zat Warna				7 – 69% <sup>11</sup>			98,75 – 99,9% <sup>18</sup>	58,7 – 100% <sup>20,21,22</sup>	95,5 – 98,5% <sup>23</sup>	72,3 – 99,5% <sup>25</sup>
Urea		72,8 – 100% <sup>2</sup>								
Lignin						68,5 – 88,4% <sup>16</sup>				
Fe					45 – 49% <sup>15</sup>					
Hg					26 – 60% <sup>15</sup>					
PO <sub>4</sub>									30 – 65% <sup>24</sup>	
Total N									49 – 79% <sup>24</sup>	
CN							13,46 – 98,53% <sup>19</sup>			
Fenol							94,75 – 99,8% <sup>18</sup>			
Kekeruhan						22,49 – 45,15% <sup>17</sup>				
DHL						10 – 15% <sup>17</sup>				
Faktor yang mempengaruhi	pH <sup>1</sup> , waktu kontak <sup>1</sup> dan Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>1</sup>	pH <sup>6</sup> , konsentrasi Fe <sup>5,7</sup> , Rasio COD/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>6</sup> dan konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Konsentrasi PMS <sup>8,9</sup> dan katalis <sup>10</sup>	pH <sup>11</sup> , waktu kontak <sup>11,13</sup> dan Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>11,12</sup>	pH <sup>15</sup> dan Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>14</sup>	Feeding rate ozon <sup>16</sup> , variasi debit udara <sup>17</sup> dan Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>16</sup>	Waktu kontak <sup>18,19</sup> , dosis GAC <sup>18</sup> dan pH <sup>19</sup>	Katalis <sup>22</sup> dan perbandingan molaritas rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :FeSO <sub>4</sub> <sup>20</sup>	Konsentrasi H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>23</sup> , Konsentrasi FeSO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>23</sup> dan perbandingan molaritas rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :FeSO <sub>4</sub> <sup>24</sup>	Tegangan <sup>25</sup> , jarak elektroda <sup>25</sup> , perbandingan molaritas rasio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :FeSO <sub>4</sub> <sup>26</sup>

Sumber : <sup>1</sup>Kusuma et al., (2017); <sup>2</sup>Darmadi, (2014); <sup>3</sup>Sholeh et al., (2013); <sup>4</sup>Yulia et al., (2016); <sup>5</sup>Elfiana et al., (2013); <sup>6</sup>Setiawan et al., (2020); <sup>7</sup>Cahyana & Permadi, (2018); <sup>8</sup>Riandy et al., (2018); <sup>9</sup>Hasrul et al., (2018); <sup>10</sup>Apriliani et al., (2019); <sup>11</sup>Setyaningtyas & Dwiasi, (2012); <sup>12</sup>Chuang et al., (2013); <sup>13</sup>Pontas & Muslim, (2015); <sup>14</sup>Yuningrat et al., (2012); <sup>15</sup>Marhaini & Wibowo, (2016); <sup>16</sup>Ristiawan & Syafila, (2015); <sup>17</sup>Fadiyah et al., (2017); <sup>18</sup>Ayuningtyas, (2020); <sup>19</sup>Enjarlis & Hardi, (2010); <sup>20</sup>Fauzi & R., (2018); <sup>21</sup>Dewi & Wardiyati, (2015); <sup>22</sup>Agustina et al., (2016); <sup>23</sup>Wardiyati et al., (2012); <sup>24</sup>Lesa et al., (2020); <sup>25</sup>Priyadi & J. A. R., (2019); <sup>26</sup>Putri et al., (2020)



Berdasarkan tabel 4.12 dapat diketahui bahwa, besar kemampuan degradasi pencemar berbeda-beda tergantung pada sistem AOPs yang dipakai dan faktor yang mempengaruhinya. Sistem yang paling baik dilihat dari kemampuannya menurunkan COD, BOD, TSS dan zat warna yaitu sistem UV/Fenton/ Katalis atau sistem  $O_3$ / GAC karena sistem tersebut memiliki kemampuan penurunan COD, BOD, TSS dan zat warna yang paling baik dibandingkan sistem lain. Maka, jika limbah yang akan diolah memiliki karakteristik COD, BOD, TSS dan zat warna yang tinggi direkomendasikan menggunakan sistem AOPs UV/Fenton/Katalis. Namun, jika karakteristik limbah mengandung unsur tertentu, seperti urea, lignin, logam dan lain lain direkomendasikan sistem AOPs yang berbeda. Untuk mendegradasi urea direkomendasikan menggunakan sistem fenton, untuk mendegradasi lignin direkomendasikan menggunakan sistem  $O_3/H_2O_2$ , untuk mendegradasi urea direkomendasikan menggunakan sistem fenton, untuk mendegradasi logam berat berupa Fe dan Hg direkomendasikan menggunakan sistem UV/  $H_2O_2$ /  $TiO_2$ , untuk mendegradasi  $PO_4$  dan Total N direkomendasikan menggunakan fotofenton dan untuk mendegradasi CN dan fenol direkomendasikan menggunakan sistem  $O_3$ / GAC.

### 4.3 Penerapan AOPs di lokasi studi kasus

Lokasi studi kasus pada tugas akhir ini yaitu RSUD Banyumas dan TPA Benowo. Lokasi studi kasus yang dipilih merupakan lokasi yang sudah menerapkan metode AOPs. Berikut Penerapan AOPs pada masing masing lokasi studi kasus

#### 4.3.1 Penerapan AOPs di RSUD Banyumas

##### Gambaran Umum

Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Banyumas merupakan rumah sakit pemerintah yang terletak di Jl. Rumah Sakit no 1 Desa Kejawar, Kecamatan Banyumas, Kabupaten Banyumas, Provinsi Jawa Tengah dengan lahan seluas 46.560 m<sup>2</sup>. Secara geografis, RSUD Banyumas terletak pada titik koordinat 7° 34' 9,71" - 7° 34' 4,57" LS dan 109° 10' 57,01" - 109° 11' 03" BT dengan batas -batas terhadap lingkungan sekitar sebagai berikut:

- Sebelah Utara : Jalan Rumah Sakit
- Sebelah Timur : Perumahan penduduk
- Sebelah Selatan : Jalan Rumah Sakit, Kantor BKKBN, SMK dan perumahan penduduk
- Sebelah Barat : Kali Kejawar dan Perumahan penduduk



**Gambar 4. 1 Peta RSUD Banyumas**

*Sumber : Google Earth*

RSUD Banyumas memiliki 2 akses keluar-masuk kendaraan yaitu Jl. Rumah sakit no.1 untuk akses masuk dan Jalan Banyumas Kemranji untuk akses keluar. RSUD Banyumas memiliki sumber daya manusia sebanyak 1.128 orang dengan berbagai jabatan dan bidang kerja serta memiliki jumlah tempat tidur sebanyak 445 orang dari berbagai kelas dan jenis ruang. Untuk total ruangan yang ada di RSUD Banyumas sendiri sekitar 66 ruang.

Secara umum, kegiatan utama RSUD Banyumas yaitu menangani pelayanan kesehatan masyarakat secara terpadu. Secara lebih khusus, pelayanan yang diberikan oleh RSUD Banyumas sebagai berikut:

1. Pelayanan Medis

Pelayanan medis meliputi pelayanan rawat jalan, pelayanan rawat inap dan Instalasi pelayanan 24 jam.

a. Pelayanan rawat jalan terdiri dari klinik penyakit dalam, klinik jantung dan pembuluh darah, klinik saraf, klinik psikiatri, klinik kulit kelamin, klinik anak, klinik bedah, klinik kebidanan dan kandungan, klinik gigi, klinik mata, klinik umum, klinik telinga, hidung dan tenggorokan, klinik konsultasi gizi, klinik tumbuh kembang anak dan klinik psikologis.

b. Pelayanan rawat inap meliputi ruang anak, ruang bersalin, ruang bayi, kelas I, kelas II, kelas III, ICU, PICU dan BBR/ NICU

c. Instalasi Pelayanan 24 jam meliputi instalasi gawat darurat dan bedah sentral

2. Pelayanan Penunjang Medik

Pelayanan penunjang medik meliputi farmasi klinik, instalasi gizi, rehabilitasi medik, radiologi, laboratorium dan CSSD rekam medis.

3. Pelayanan Non-medis

Pelayanan non-medis meliputi instalasi pemeliharaan sarana, sanitasi, instalasi pemulasaraan jenazah, pemeliharaan elektro medis, penanganan linen, keuangan, diklat, rumah tangga, tata usaha dan humas.

## Jenis Limbah

Jenis limbah di RSUD Banyumas dibagi menjadi 4, antara lain:

a. *Floor Drain*

*Floor drain* atau avur lantai merupakan saringan pada saluran pembuangan air pada kamar mandi yang digunakan untuk menyaring kotoran dan sampah serta mencegah adanya genangan air. Limbah dari *floor drain* biasanya mengandung sabun atau deterjen sehingga tidak dapat disatukan dengan limbah dari *septic tank* karena akan menghambat aktivitas mikroorganisme di *septic tank*. Oleh karena itu, RSUD melakukan *pretreatment* terlebih dahulu yaitu dengan bak kontrol.

b. Ruang gizi

Limbah yang dihasilkan dari ruang gizi mengandung minyak dan lemak yang cukup tinggi sehingga RSUD Banyumas melakukan *pretreatment* dengan menggunakan *grease trap* dengan tujuan agar kandungan minyak dan lemaknya berkurang dan tidak mengganggu kerja IPAL. Setelah itu, masuk ke dalam bak kontrol dan disalurkan ke IPAL.

c. *Septic tank*

*Septic tank* atau tangki septik merupakan suatu tangki bawah tanah yang digunakan untuk pengendapan limbah domestik/rumah tangga. *Septic tank* biasanya digunakan untuk pengendapan limbah yang berasal dari kakus. Pada pengolahan limbah di RSUD Banyumas, limbah *Septic tank* juga dilakukan *pre-treatment* dahulu sebelum masuk ke IPAL yaitu dengan bak kontrol. Jenis limbah ini dijadikan satu

dengan limbah darah dalam *pre-treatment* karena dapat diolah dengan mikroorganisme yang sama.

d. *Laundry*

*Laundry* adalah kegiatan mencuci pakaian atau bahan tekstil lainnya. Limbah dari *laundry* biasanya mengandung surfaktan yang berasal dari detergen. Pada pengolahan di RSUD Banyumas, limbah *laundry* dilakukan *pre-treatment* dahulu sebelum masuk ke IPAL yaitu dengan bak kontrol. Limbah *laundry* juga tidak dapat digabungkan dengan limbah *septic tank* dan limbah darah karena seperti halnya pada limbah *floor drain*, limbah *laundry* mengandung surfaktan atau sabun yang akan menghambat mikroorganisme yang ada di *septic tank*.

**Karakteristik Air Limbah**

Hasil pengukuran karakteristik air limbah RSUD Banyumas pada inlet IPAL dapat dilihat pada Tabel 4.13

**Tabel 4. 13 Karakteristik Air Limbah RSUD Banyumas**

Parameter	Satuan	Hasil	Baku Mutu*
pH		7,2	6-9
BOD	mg/L	72	30
COD	mg/L	124	100
TSS	mg/L	31	30
Minyak Lemak	mg/L	4,9	5
Ammonia (NH3-N)	mg/L	0,13	10
Total Coliform	Jumlah/100 mL	>24.000	3000

*Sumber : Hasil Laboratorium*

\*Baku mutu : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik

Tabel 4.13 merupakan data primer hasil pengukuran karakteristik air limbah RSUD Banyumas yang diperoleh dari pengambilan sampel dengan tipe sampling sesaat yang kemudian diuji di laboratorium DLH Cilacap. Baku mutu air limbah yang diterapkan oleh RSUD Banyumas yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah lampiran XLIV yang bagian B dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik. Berdasarkan karakteristik pada tabel 4.10, dapat diketahui bahwa karakteristik air limbah RSUD Banyumas memiliki total coliform yang tinggi. Selain itu, terdapat beberapa parameter yang masih melampaui baku mutu seperti BOD, COD, TSS dan juga total coliform. Namun terdapat juga, parameter yang sudah memenuhi baku mutu seperti pH, minyak dan lemak serta amonia. Hal itu terjadi karena sebelum masuk ke IPAL, masing masing jenis limbah dilakukan pretreatment terlebih dahulu.

**Debit Limbah**

Rata-rata debit air limbah outlet RSUD Bayumas yaitu 232 m<sup>3</sup>/hari atau 7.046 m<sup>3</sup>/bulan dengan rincian data yang dapat dilihat pada Tabel 4.14.

**Tabel 4. 14 Rekap Data Debit Outlet Air Limbah RSUD Banyumas Tahun 2021**

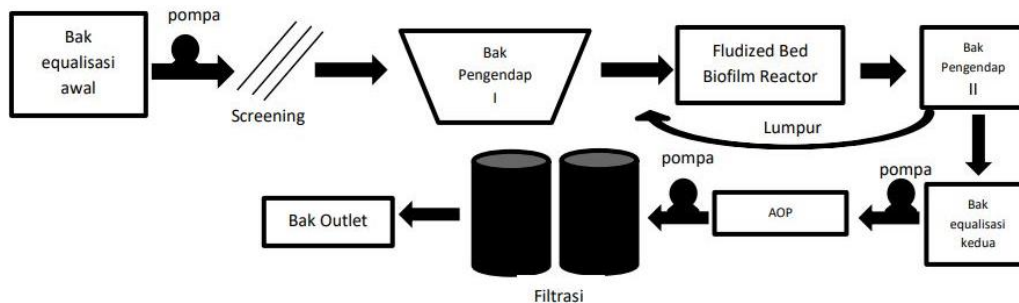
Bulan	Debit Perbulan (m <sup>3</sup> /bulan)	Debit perhari(m <sup>3</sup> /hari)
Januari	7.338	237

Bulan	Debit Perbulan (m <sup>3</sup> /bulan)	Debit perhari(m <sup>3</sup> /hari)
Februari	7.730	276
Maret	9.362	302
April	8.835	295
Mei	7.379	238
Juni	7.605	254
Juli	7.812	252
Agustus	6.979	225
September	4.191	135
Oktober	4.992	161
November	6.450	215
Desember	5.878	190

Sumber : Data Sekunder dari RSUD Banyumas

### Diagram Alir IPAL

Diagram alir IPAL pada RSUD Banyumas dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Diagram Alir IPAL RSUD Banyumas

Sumber : Gambar Penulis

IPAL RSUD Banyumas terdiri dari dua yaitu IPAL lama dan IPAL baru. IPAL lama berawal dari bak equalisasi awal hingga bak equalisasi kedua dan untuk IPAL baru berawal dari bak equalisasi II hingga outlet. Berikut penjelasan dari diagram alir IPAL RSUD Banyumas:

Setelah dilakukan *pretreatment* pada masing masing jenis limbah, limbah tersebut disatukan pada bak equalisasi awal, bak equalisasi awal ini berfungsi untuk menggabungkan berbagai jenis limbah dari berbagai sumber dan termasuk inlet dari IPAL RSUD Banyumas.

Setelah itu dipompa menuju *screening* dan bak pengendap I, *screening* ini bertujuan untuk menyaring segala jenis sampah kasar yang akan menghambat proses pengolahan dan untuk bak pengendap I digunakan untuk pengendapan limbah dengan waktu yang lebih lama dibandingkan bak kontrol.

Lalu disalurkan ke pengolahan biologis yang berupa *fluidized bed biofilter reactor* yang dilengkapi dengan *diffuser* atau blower. Pengolahan biologis ini merupakan pengolahan biologis aerob dengan media aerob berupa *bioball*. Setelah itu, limbah diendapkan ke bak pengendap II yang dilengkapi dengan *scraper*. *Scraper* digunakan untuk menyapu lumpur yang ada di dasar bak pengendap II.

Lumpur yang dihasilkan di bak pengendap II dikembalikan ke pengolahan biologis untuk digunakan kembali hingga tidak bisa dipakai lagi. Lumpur yang sudah tidak bisa dipakai dikeringkan pada *Sludge drying bed* lalu dikirimkan ke pengolahan limbah B3.

Setelah bak pengendap II, air di alirkan ke bak equalisasi kedua yang sebelumnya merupakan outlet dari IPAL lama, pada unit ini juga terjadi proses pengendapan. Lalu air limbah di pompa menuju unit AOP. Unit AOP menggunakan sistem Ozon/UV serta media sarang tawon didalamnya. Setelah itu, limbah dipompa menuju unit filtrasi untuk diolah. Media filter yang digunakan yaitu batu silika dan batu zeolit.

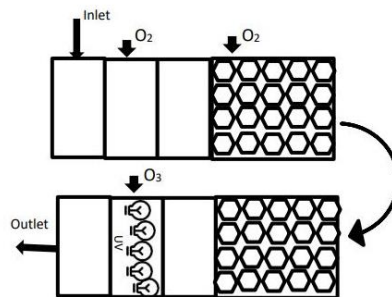
Setelah unit filtrasi, air limbah yang diolah dialirkan ke saluran outlet. Saluran outlet diberi ikan dengan tujuan sebagai indikator pencemaran. Setelah itu, air yang sudah diolah dibuang ke sungai.

### Sistem AOP yang diterapkan

Sistem AOP pada IPAL RSUD Banyumas memiliki kapasitas 13 m<sup>3</sup>/jam atau 312 m<sup>3</sup>/hari. Sistem AOP ini mulai diterapkan pada IPAL RSUD Banyumas sejak tahun 2018 dengan tujuan untuk mengganti sistem IPAL yang lama atau konvensional. Akan tetapi, terdapat banyak kendala dalam pengoperasiannya sehingga pengolahan pada sistem ini tidak berjalan maksimal. Maka, pengolahan limbah cair pada RSUD Banyumas tetap menggabungkan antara bangunan IPAL lama dengan yang baru untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal. Sistem IPAL yang baru ini terdiri dari dua unit yaitu unit sistem AOP dan unit filtrasi.

- Unit Sistem AOP

Sistem AOP yang digunakan pada IPAL RSUD Banyumas yaitu sistem O<sub>3</sub>/UV dengan media sarang tawon. Sketsa sistem AOP IPAL RSUD Banyumas dapat dilihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4. 3 Sketsa Sistem AOP pada IPAL RSUD Banyumas**

*Sumber : Gambar Penulis*

Air limbah yang akan diolah masuk melalui inlet kemudian menuju bak dan terjadi proses aerasi, setelah itu, air limbah tersaring oleh media sarang tawon dan kemudian air limbah masuk ke proses AOP utama dengan aerasi gas ozon dan lampu UV lalu menuju unit filtrasi. Lampu UV yang digunakan yaitu lampu merk “YANG” sebesar 45 watt. Jumlah lampu UV yang digunakan sebanyak 5 buah sehingga kekuatan sinar UV yang direaksikan sebesar 225 watt.

Untuk ozon yang dihasilkan berasal dari udara disekitar yang diubah menjadi ozon menggunakan ozon generator. Akan tetapi, untuk saat ini, ozon generator tidak berfungsi sehingga hanya direaksikan dengan sinar UV saja.

- Unit Filtrasi

Setelah melalui AOP, air limbah dialirkan ke unit filtrasi. Air limbah yang telah dioksidasi akan menjadi lebih mudah di filter. Unit Filter ini berfungsi untuk menyaring polutan serta mengurangi atau menghilangkan kandungan ozon yang masih tersisa.

Media unit filtrasi yang digunakan yaitu batu zeolit dan batu silika. Namun, pada kondisi saat ini, pompa menuji filtrasi terjadi kerusakan sehingga air yang seharusnya dialirkan menuju unit filtrasi langsung dialirkan menuju outlet.

### Efektifitas penyisihan parameter pencemar oleh AOP

Untuk mengetahui efektifitas penyisihan pencemar oleh AOP, perlu diketahui kandungan pencemar inlet dan outlet dari sistem AOP ini. Parameter yang diuji berupa BOD, COD, TSS, minyak dan lemak, amoniak ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) dan total coliform. Rumus untuk menghitung efektifitas pencemar yaitu :

$$\%R = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100\%$$

Dimana:

$C_i$  = Konsentrasi Inlet

$C_o$  = Konsentrasi Outlet

Efektifitas penurunan masing masing parameter pencemar oleh AOP pada IPAL RSUD Banyumas dapat dilihat pada tabel 4.15.

**Tabel 4. 15 Data Efektifitas Penurunan Parameter Pencemar oleh AOP pada IPAL RSUD Banyumas**

Parameter	Satuan	$C_i^{1)}$	$C_o^{1)}$	$\%R^{2)}$
BOD	mg/L	12	7	41,67%
COD	mg/L	18	12	33,3%
TSS	mg/L	15	11	26,67%
Minyak dan lemak	mg/L	4	2,5	37,5%
Ammoniak ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )	mg/L	0,01	0,02	-
Total Coliform	Jumlah/100 mL	>24.000	5.000	> 79,17%

Sumber : <sup>1)</sup> Hasil Laboratorium; <sup>2)</sup> Hasil Perhitungan

### Perawatan dan pemeliharaan

Perawatan dan pemeliharaan yang dilakukan oleh RSUD Banyumas terbagi menjadi 4 jenis berdasarkan kurun waktu yang diperlukan yaitu pemeliharaan harian, mingguan, bulanan dan tahunan.

- **Pemeliharaan Harian**

Pemeliharaan harian terdiri dari pengecekan kondisi tangki dari kebocoran, pengecekan kondisi tangki filter dari kebocoran, pengecekan kebocoran air pada bagian pompa dan pemipaan, pengecekan aerasi pada tangki, pengecekan kondisi nyala lampu indikator pada ozon generator, pengecekan kondisi nyala lampu UV dan pengecekan kondisi nyala lampu indikator pada panel kontrol.

- **Pemeliharaan Mingguan**

Pemeliharaan mingguan terdiri dari pembersihan bagian luar tangki dan tangki filter, pembersihan bagian luar pompa, pengecekan kondisi putaran pada motor listrik, pembersihan bagian luar blower, pengecekan kondisi suara putaran pada motor listrik, pembersihan bagian luar oksigen generator, pembersihan bagian luar atau panel ozon generator dan pembersihan bagian luar dan dalam panel kontrol.

- **Pemeliharaan Bulanan**  
Pemeliharaan bulanan terdiri dari pengecekan koneksi kabel listrik, pengecekan udara keluaran blower pada tangki aerasi, pengecekan *air life pump* pada tangki klarifier dan aerasi, pengecekan flowmeter oksigen generator, pengecekan udara keluaran pada selang yang masuk *reactor* ozon generator, pengecekan kondisi reaktor ozon, pengecekan kondisi komponen pada PCB ozon generator, pengecekan koneksi kabel sumber dan kabel beban, pengecekan kinerja *pressure switch* pada tiap pompa, pengecekan kinerja level kontrol di setiap tangki dan bak equalisasi, pengecekan, kebocoran di jalur pipa dan pengecekan kinerja *valve* yang terpasang.
- **Pemeliharaan Tahunan**  
Pemeliharaan tahunan terdiri dari pembersihan bagian dalam tangki dan pergantian media filter.

#### **Kelebihan dan Kekurangan AOP yang dirasakan oleh RSUD Banyumas**

- Kelebihan yang dirasakan RSUD Banyumas selama menerapkan AOP yaitu:
  - a. Lebih efektif dalam membunuh bakteri *ecoli*
- Kekurangan yang dirasakan RSUD Banyumas selama menerapkan AOP yaitu:
  - a. Perawatan dan pemeliharaan cukup sulit seperti lampu uv yang sering mati dan ozon generator yang rusak
  - b. Biaya perawatan dan pemeliharaan yang tinggi

#### **4.3.2 Penerapan AOPs di TPA Benowo**

##### **Gambaran Umum**

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo merupakan tempat pembuangan akhir pemerintah milik Kota Surabaya dimana seluruh sampah yang berada di TPA Benowo berasal dari Kota Surabaya. Pengelolaan sampah di TPA Benowo dikelola oleh PT. Sumber Organik sejak Oktober 2012 dan pengelolaannya tetap bekerja sama dengan pemerintah Kota Surabaya. TPA Benowo terletak di wilayah Kelurahan Romokalisari, Kecamatan Benowo, Kota Surabaya yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Gresik dengan lahan seluas 374.065 m<sup>2</sup>. Titik tengah TPA Benowo terletak pada titik koordinat 7<sup>0</sup> 13'7,89" LS dan 112<sup>0</sup> 37' 47,13" LS. Lokasi TPA Benowo baik dari arah utara, timur, selatan dan barat dikelilingi oleh tambak garam/ikan milik penduduk.



**Gambar 4. 4 TPA Benowo**  
*Sumber : Dokumentasi Penulis*



## Jenis Limbah

Jenis Limbah yang diolah pada instalasi pengolahan limbah di TPA Benowo adalah air lindi. Air lindi merupakan air dengan konsentrasi kandungan organik yang tinggi yang terbentuk dalam landfill akibat adanya air hujan yang masuk ke dalam landfill. Air lindi merupakan air limbah yang sangat berbahaya karena kandungan organik yang tinggi serta terdapat kandungan logam didalamnya. Jika tidak ditangani dengan baik, air lindi dapat menyerap dalam tanah sekitar landfill kemudian dapat mencemari air tanah disekitar landfill.

## Karakteristik Air Lindi

Hasil pengukuran karakteristik air lindi TPA Benowo pada inlet IPL dapat dilihat pada Tabel 4.16.

**Tabel 4. 16 Karakteristik Air Lindi TPA Benowo**

Parameter	Satuan	Hasil	Baku Mutu*
pH		8,05	6-9
BOD	mg/L	540	150
COD	mg/L	1636	300
TSS	mg/L	63	100
N-Total	mg/L	25,2	60
Merkuri (Hg)	mg/L	0,00078	0,005
Cadmium (Cd)	mg/L	<0,003	0,1

*Sumber : Hasil Laboratorium*

\*Baku mutu : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemroses Akhir Sampah

Pada tabel 4.16 data primer hasil pengukuran karakteristik air lindi TPA Benowo yang diperoleh dari pengambilan sampel yang kemudian diuji di laboratorium Envilab atau *Environmental Laboratory* yang ada di Surabaya. Baku mutu air limbah yang diterapkan oleh TPA Benowo yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NOMOR P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemroses Akhir Sampah. Berdasarkan karakteristik pada tabel 4.12, dapat diketahui bahwa karakteristik air lindi TPA Benowo memiliki TSS yang tinggi. Selain itu, terdapat beberapa parameter yang masih melampaui baku mutu seperti COD dan TSS. Namun terdapat juga, parameter yang sudah memenuhi baku mutu seperti pH, BOD, N-total, Hg dan Cd. Penyebab hal tersebut terjadi salah satunya karena lindi yang ada dikumpulkan di *leachate pond* sehingga terjadi proses sedimentasi sebelum diolah pada IPL.

## Debit Limbah

Rata-rata debit air lindi TPA Benowo dalam 5 bulan pertama pada tahun 2022 yaitu 502,4 m<sup>3</sup>/hari untuk inlet IPL dan 326,4 m<sup>3</sup>/hari untuk outlet IPL dengan rincian data yang dapat dilihat pada tabel 4.17.

**Tabel 4. 17 Rekap Data Debit Air Lindi TPA Benowo Tahun 2022 (Januari-Mei)**

Bulan	Debit Inlet (m <sup>3</sup> /hari)	Debit outlet (m <sup>3</sup> /hari)
Januari	459	299
Februari	504	327
Maret	571	371
April	507	329
Mei	471	306

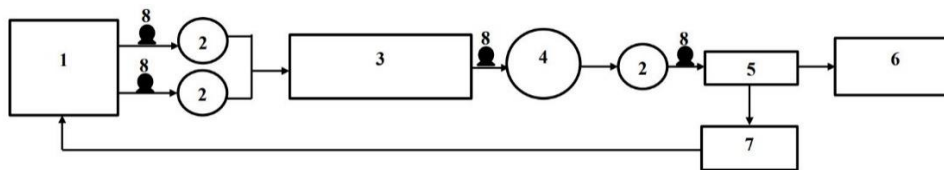


Bulan	Debit Inlet (m <sup>3</sup> /hari)	Debit outlet (m <sup>3</sup> /hari)
Rata-rata	502,4	326,4

Sumber : Data Sekunder dari TPA Benowo

### Diagram Alir IPL

Diagram alir IPL pada TPA Benowo dapat dilihat pada gambar 4.5.



Keterangan :

1. *Leachate Pond*    3. AOP    5. Nano filter    7. *Final Holding Tank*  
 2. *Bag Filter*    4. *Multimedia Filter*    6. *Reject Pond*    8. Pompa

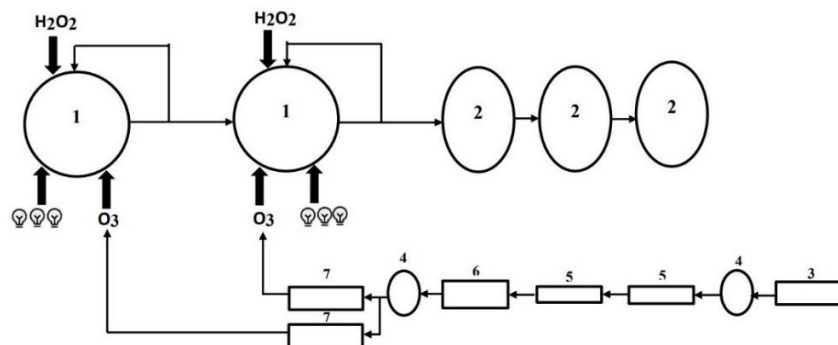
**Gambar 4. 5 Diagram Alir IPL TPA Benowo**

Sumber : Gambar Penulis

Instalasi pengolahan lindi pada TPA Benowo diawali pada *Leachate Pond*. *Leachate pond* merupakan kolam penampungan lindi yang termasuk inlet dari instalasi pengolahan lindi di TPA Benowo. Lalu air lindi tersebut dialirkan menuju ke *bag filter*. *Bag filter* berfungsi untuk mengurangi zat pengotor agar tidak mengganggu proses pengolahan selanjutnya. Kemudian, air lindi dialirkan menuju unit AOP. Unit AOP terdiri dari reaktor oksidasi dan *holding tank* dan sistem yang digunakan yaitu sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>. Selanjutnya, air lindi dipompa menuju ke multimedia filter. Sebelum dipompa menuju ke nano-filter, air lindi dialirkan terlebih dahulu ke *bag filter*. Pada unit nano-filter, air lindi dilewatkan pada pompa bertekanan tinggi dan diteruskan menuju ke membran nano-filter. Air lindi yang diproses dalam nano-filter terbagi menjadi dua yaitu produk terolah yang sudah memenuhi baku mutu dan produk *reject* yang dialirkan ke *reject pond* dan dikembalikan ke *leachate pond* untuk diolah kembali dari awal. Produk yang telah memenuhi baku mutu lalu dialirkan menuju ke *final holding tank* dan air yang sudah diolah digunakan kembali untuk menyiram roda truk dan mencuci alat berat yang ada di TPA Benowo.

### Sistem AOP yang diterapkan

Sistem AOPs pada IPL TPA Benowo memiliki kapasitas 600-1200 m<sup>3</sup>/hari. Sistem IPL yang digunakan yaitu sistem AOP yang mengkombinasikan antara ozon, lampu UV dan hidrogen peroksida. Sketsa sistem AOP IPL TPA Benowo dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Keterangan :

1. *Oxidation Reactor*    3. *Air Compressor*    5. *Air Dryer*    7. *Ozon Generator*  
 2. *Holding Tank*    4. *Tank*    6. *Oxygen Generator*

**Gambar 4. 6 Sketsa Sistem AOP pada IPL TPA Benowo**

Sumber : Gambar Penulis

Unit AOP diawal dengan reaktor oksidasi I, pada reaktor oksidasai ini terjadi penambahan hidrogen peroksida. Pada reaktor oksidasi I dilengkapi dengan pengaduk untuk menyempurnakan proses reaksi air lindi dengan hidrogen peroksida, lalu air lindi dialirkan melalui pompa sirkulasi melewati venturi untuk diinjeksi ozon menuju UV reaktor untuk dilewatkan dalam sinar ultra violet. Lalu air lindi dialirkan kembali menuju ke reaktor oksidasi I, pada reaktor oksidasi I terdapat proses resirkulasi sehingga aliran terbagi menjadi 2 yaitu aliran pertama kembali ke reaktor oksidasi I dan aliran kedua menuju reaktor oksidasi II. Lalu pada reaktor oksidasi II, air lindi juga diperlakukan sama seperti pada reaktor oksidasi I, hingga sampai ke tahap resirkulasi yang membuat aliran terbagi menjadi dua yaitu aliran kembali menuju reaktor oksidasi II dan aliran menuju ke holding tank I. Setelah Holding Tank I penuh, maka air lindi mengalir secara overflow ke Holding Tank II lalu diteruskan ke Holding Tank II. Setelah Holding Tank II penuh maka air lindi di pompa menuju multi media filter dan ke nano filter.

Untuk ozon yang digunakan pada proses AOP ini berasal dari udara ambien yang diolah terlebih dahulu menjadi ozon. Untuk proses pembentukan ozon berawal dari ditangkapnya udara ambien oleh *air compresor* lalu dikumpulkan pada sebuah *tank*, kemudian dilakukan pengeringan udara oleh *air dryer*, lalu dimasukkan ke *oxygen generator* untuk dipilah oksigennya saja. Setelah itu oksigen yang dihasilkan disimpan pada *tank* kedua, baru dimasukkan ke *ozon generator* untuk diubah menjadi ozon. Setelah terbentuk ozon maka ozon dapat diinjeksi pada proses AOP. Dalam penerapannya, besar feeding rate ozonnya sebesar 125-200 LPM.

Lalu untuk penambahan hidrogen peroksida juga ditentukan dosisnya, tidak boleh kurang dan tidak boleh berlebih. Rentang dosis hidrogen peroksida yang diperbolehkan didasarkan pada percobaan di awal pembangunan unit AOP yaitu sekitar 630-1050 kg/hari hidrogen peroksida. Sedangkan untuk dosis setiap harinya didasarkan pada TDS limbah yang dicek juga setiap harinya atau dengan memperhatikan perubahan warna limbah pada reaktor oksidasi melalui flowmeter. Untuk hidrogen peroksida yang digunakan yaitu hidrogen peroksida 32%.

Kemudian, untuk sumber UV yang digunakan berupa lampu UV berkekuatan 80 watt berjumlah 19 buah pada 1 reaktor, sehingga total kekuatan yang direaksikan ke air limbah sebesar 1520 watt untuk 1 reaktor. Dikarenakan jumlah reaktor pada IPL TPA Benowo sebesar 2 buah, maka keseluruhan kekuatan sinar UV yang direaksikan dalam mengolah limbah sebesar 3040 watt dengan jumlah total lampu sebanyak 38 buah.

### **Efektifitas penyisihan parameter pencemar oleh sistem AOP-NF**

Untuk mengetahui efektifitas penyisihan pencemar oleh AOP-NF, perlu diketahui kandungan pencemar inlet dan outlet dari sistem AOP ini. Parameter yang diuji berupa BOD, COD, TSS, N-total, Merkuri(Hg) dan Cadmium(Cd). Rumus untuk menghitung efektifitas pencemar yaitu :

$$\%R = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100\%$$

Dimana:

$C_i$  = Konsentrasi Inlet

$C_o$  = Konsentrasi Outlet

Efektifitas penurunan masing masing parameter pencemar oleh sistem AOP-NF pada IPL TPA Benowo dapat dilihat pada tabel 4.18.

**Tabel 4. 18 Data Efektifitas Penurunan Parameter Pencemar oleh AOP-NF pada IPL TPA Benowo**

Parameter	Satuan	C <sub>i</sub> <sup>1)</sup>	C <sub>o</sub> <sup>1)</sup>	%R <sup>2)</sup>
BOD	mg/L	540	29	94,63%
COD	mg/L	1636	87	94,68%
TSS	mg/L	63	3	95,24%
N-Total	mg/L	25,2	0,83	96,71%
Merkuri (Hg)	mg/L	0,00078	0,00042	46,15%
Cadmium (Cd)	mg/L	<0,003	<0,003	-

Sumber : <sup>1)</sup> Hasil Laboratorium; <sup>2)</sup> Hasil Perhitungan

### Perawatan dan pemeliharaan

Perawatan dan pemeliharaan yang dilakukan oleh TPA Benowo dan terdapat hanya pada perawatan dan pemeliharaan multimedia filter dan nano filter dikarenakan pada AOP jarang terjadi kerusakan bahkan hingga tahunan tidak terjadi kerusakan. Sedangkan untuk multimedia dan nano filter, perawatan dan pemeliharaan yang dilakukan rutin yaitu berupa *backwash* dan *rinse*. Kedua hal tersebut dilakukan setiap 2-3 hari sekali dan untuk data perawatan serta pemeliharaan yang terjadi selama 5 bulan terakhir dapat dilihat pada tabel 4.19.

**Tabel 4. 19 Data Perawatan dan Pemeliharaan TPA Benowo**

No	Tanggal	Perbaikan
1.	08/01/2022	Pergantian seal yang bocor
2.	15/01/2022	Pengurusan kolam proses bawah
3.	22/01/2022	Pengurusan kolam proses atas
4.	29/01/2022	Pergantian Flange Sirkulasi
5.	12/02/2022	Cleaning RO
6.	26/02/2022	Pengurusan kolam proses atas
7.	05/03/2022	Perbaikan jalur pipa inlet (buntu)
8.	12/03/2022	Pengurusan kolam proses bawah
9.	26/03/2022	Pengurusan kolam proses atas
10.	09/04/2022	Pergantian pompa sirkulasi
11.	16/04/2022	Pengurusan kolam proses bawah
12.	30/04/2022	Pergantian flowmeter sirkulasi
13.	07/05/2022	Pergantian flowmeter inlet
14.	21/05/2022	Pengurusan kolam proses bawah

Sumber: Data Sekunder TPA Benowo

### Kelebihan dan Kekurangan AOP yang dirasakan oleh TPA Benowo

- Kelebihan yang dirasakan TPA Benowo selama menerapkan AOP yaitu:
  - a. Tidak membutuhkan lahan yang luas, sebelum menerapkan AOP luas lahan yang dibutuhkan untuk pengolahan lindi sekitar 3 Ha sedangkan setelah menerapkan AOP luas lahan yang dibutuhkan hanya setengah dari yang sebelumnya.
  - b. Tidak menghasilkan lumpur yang bersifat B3.
  - c. Operasi dan pemeliharannya mudah sehingga tidak membutuhkan operator dengan jumlah yang banyak.
- Kekurangan yang dirasakan TPA Benowo selama menerapkan AOP yaitu:

- a. Biaya operasi atau produksinya tinggi bahkan termasuk tertinggi kedua dari keseluruhan biaya yang dikeluarkan oleh TPA Benowo.

#### 4.3.3 Perbandingan Kedua Studi Kasus dalam berbagai Aspek

Setelah didapatkan data primer dan sekunder dari kedua tempat studi kasus yang sudah dituliskan pada subbab 4.3.1 dan 4.3.2. Maka, dapat dibandingkan kedua studi kasus dari berbagai aspek. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.20.

**Tabel 4. 20 Perbandingan Kedua Studi Kasus dalam Berbagai Aspek**

Aspek	Studi Kasus	
	RSUD Banyumas	TPA Benowo
Jenis Limbah yang diolah	Limbah rumah sakit non-B3	Lindi
Karakteristik limbah	pH = 7,2 BOD = 72 mg/L COD = 124 mg/L TSS = 31 mg/L Minyak dan Lemak = 4,9 mg/L Ammonia (NH <sub>3</sub> -N) = 0,13 mg/L Total Coliform = >24.000 Jumlah/100 mL	pH = 8,05 BOD = 540 mg/L COD = 1636 mg/L TSS = 63 mg/L N-Total = 25,2 mg/L Merkuri (Hg) = 0,00078 mg/L Cadmium (Cd) = <0,003 mg/L
Diagram alir	Bak equalisasi awal → <i>Screening</i> → Bak pengendap I → Fludized Bed Film Reactor → Bak pengendap II → Bak equalisasi kedua → AOP → Filtrasi → Outlet	<i>Leachate Pond</i> → <i>Bag Filter</i> → AOP → Multimedia Filter → Nano filter → <i>Final Holding Tank</i>
Sistem AOP	UV/O <sub>3</sub> + media sarang tawon	UV/O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Nanofilter
Posisi AOP pada pengolahan limbah	Pengolahan lanjut ( <i>post-treatment/ tertiary treatment</i> )	Pengolahan utama
Kondisi proses	UV = 225 watt O <sub>3</sub> = rusak/tidak bisa digunakan	UV = 3040 watt O <sub>3</sub> = 125-200 LPM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (32%) = 630-1050 kg/hari
Efisiensi penurunan pencemar	BOD = 41,67% COD = 33,3% TSS = 26,67% Minyak dan lemak = 37,5% Total coliform = 79,17%	BOD = 94,63% COD = 94,68% TSS = 95,24% N-Total = 96,71% Merkuri = 46,15%.
Air olahan	Dibuang ke badan air	Digunakan kembali untuk mencuci roda truk dan mencuci alat berat
Kelebihan	Lebih efektif dalam membunuh bakteri <i>ecoli</i>	a. Tidak membutuhkan lahan yang luas. b. Tidak menghasilkan lumpur yang bersifat B3. c. Operasi dan pemeliharaannya mudah sehingga tidak membutuhkan operator

Aspek	Studi Kasus	
	RSUD Banyumas	TPA Benowo
		dengan jumlah yang banyak.
Kekurangan	a. Perawatan dan pemeliharaan cukup sulit seperti lampu uv yang sering mati dan ozon generator yang rusak b. Biaya perawatan dan pemeliharaan yang tinggi	Biaya operasi atau produksinya tinggi

Berdasarkan Tabel 4.20 dapat diketahui bahwa :

- Keefektifan penurunan pencemar TPA Benowo lebih tinggi dibandingkan dengan RSUD Banyumas. Hal itu dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti:
  - a. Posisi AOP dalam instalasi pengolahannya, pada RSUD Banyumas, AOP berfungsi sebagai post-treatment sehingga pengolahan tersebut hanya membantu mendegradasi polutan yang tidak dapat diurai pada pengolahan sebelumnya sedangkan pada TPA Benowo AOP berfungsi sebagai pengolahan utama sehingga konsentrasi limbah yang diolah AOP pun berbeda dengan RSUD Banyumas.
  - b. Sistem AOP yang digunakan, pada RSUD Banyumas, sistem AOP yang digunakan yaitu UV/O<sub>3</sub> dengan media sarang tawon sedangkan pada TPA Benowo, sistem AOP yang digunakan yaitu UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dengan nanofilter.
  - c. Kondisi proses, pada RSUD Banyumas, kekuatan UV yang digunakan lebih kecil dibandingkan TPA Benowo, lalu untuk ozon tidak berfungsi dengan baik sedangkan pada TPA Benowo kekuatan UV lebih besar dibandingkan RSUD Banyumas, ozon berfungsi dengan baik dan terjadi penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.
- Kedua studi kasus memiliki kekurangan yang sama yaitu memerlukan biaya yang tinggi yang merupakan kekurangan utama dari AOP itu sendiri. Namun, terdapat perbedaan kekurangan dari kedua studi kasus tersebut. Jika pada RSUD Banyumas merasa bahwa perawatan dan pemeliharaannya cukup sulit karena lampu UV sering mati dan ozon generator rusak sedangkan pada TPA Benowo tidak merasakan itu. Hal tersebut terjadi karena pada RSUD Banyumas, lampu UV langsung diletakkan dengan posisi tercelup di dalam air sehingga mengakibatkan lampu UV mudah mati sedangkan pada TPA Benowo lampu UV tidak langsung tercelup di dalam air, antara lampu UV dan air masih dipisahkan oleh pelindung. Maka dari itu, kelebihan dan kekurangan tersebut dapat diminimalisir tergantung pada cara menerapkannya.
- Sistem AOP sangat efektif jika digunakan untuk mengolah limbah yang mengandung polutan sulit terurai dan/atau berbahaya yang tidak dapat diolah dengan pengolahan limbah konvensional karena dengan biaya yang tinggi sebanding dengan kemampuan dalam mendegradasi pencemarnya yang mengalami perbedaan yang cukup signifikan dibandingkan dengan diolah menggunakan pengolahan limbah konvensional sehingga layak untuk dipertimbangkan. Namun, kurang efektif jika digunakan untuk mengolah limbah dengan kandungan polutan yang masih dapat diolah dengan pengolahan limbah konvensional karena membutuhkan biaya yang lebih tinggi dibandingkan pengolahan limbah konvensional sedangkan kemampuan pendegradasiannya tidak terjadi perbedaan yang signifikan.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang diterapkan di Indonesia, antara lain *sonochemical*, fenton, *peroxymonosulfate*/katalis, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/GAC, UV/fenton/katalis, fotofenton dan elektronfenton. Sistem tersebut dapat digunakan dalam mengolah berbagai limbah industri, limbah domestik, limbah rumah sakit, limbah lindi dan limbah laboratorium. Prinsip kerja pada masing masing sistem pada prinsipnya sama yaitu memproduksi radikal bebas baik berbentuk radikal hidrosil maupun radikal sulfat yang berfungsi untuk mendegradasi kontaminan. Akan tetapi, yang membedakan adalah cara memproduksi radikal bebas tersebut.
2. Efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) berbeda beda tergantung jenis sistem AOPs yang digunakan. Efisiensi penurunan COD tertinggi yaitu pada sistem elektrofenton sebesar 47,78-94,1%, efisiensi penyisihan BOD tertinggi yaitu pada sistem O<sub>3</sub>/GAC sebesar 18,18-82,42%, efisiensi penyisihan TSS tertinggi yaitu pada sistem UV/fenton/katalis sebesar 73,4-94,5%, efisiensi penyisihan warna tertinggi yaitu pada sistem O<sub>3</sub>/GAC sebesar 98,75-99,9%, efisiensi penyisihan urea pada sistem fenton sebesar 72,8-100%, efisiensi penyisihan lignin pada sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 68,5-88,4%, efisiensi penyisihan Fenol pada sistem O<sub>3</sub>/GAC sebesar 95,75-99,8%, efisiensi penyisihan CN pada sistem O<sub>3</sub>/GAC sebesar 90,69-98,53%, efisiensi penyisihan Fe pada sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> sebesar 45-49%, efisiensi penyisihan Hg pada sistem UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> sebesar 26-60%, efisiensi penyisihan PO<sub>4</sub> pada sistem fotofenton sebesar 30-65%, efisiensi penyisihan Total N pada sistem fotofenton sebesar 49-79%, efisiensi penyisihan kekeruhan dan DHL tertinggi pada sistem O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 22,49-45,15%, dan 10-15%. Besar efisiensi penurunan pencemar pada AOPs selain dipengaruhi jenis sistem yang digunakan, juga dipengaruhi faktor lain seperti kondisi pH, waktu reaksi, konsentrasi hidrogen peroksida, konsentrasi reagen Fe, konsentrasi PMS, suhu, variasi debit udara, *feeding rate* ozon, dosis GAC, perbandingan molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: FeSO<sub>4</sub>, dosis katalis, tegangan listrik, jarak elektroda dan rasio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/COD.
3. Sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang diterapkan di RSUD Banyumas yaitu menggunakan O<sub>3</sub>/UV ditambah media sarang tawon dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 41,67%; COD 33,3%; TSS 26,67%; minyak dan lemak 37,5% dan total coliform 79,17% sedangkan sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang diterapkan di TPA Benowo yaitu menggunakan O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ditambah nanofilter dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 94,63%; COD 94,68%; TSS 95,24%; N-Total 96,71% dan Merkuri 46,15%.

### 5.2 Saran

Metode *advanced oxidation process* memiliki kelemahan yaitu membutuhkan biaya yang tinggi untuk modal, pengoperasian dan perawatannya dan salah satu solusinya yaitu menerapkannya sebagai pra-pengolahan atau pengolahan lanjut. Maka perlu dilakukan pembahasan lebih lanjut mengenai penerapan AOPs sebagai pra-pengolahan dan pengolahan lanjut beserta biaya dibutuhkan untuk menerapkannya

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, T. E., Bustomi, A., & Manalaoon, J. (2016). Pengaruh konsentrasi TiO<sub>2</sub> dan konsentrasi limbah pada proses pengolahan limbah pewarna sintetik procion red dengan metode UV/Fenton/TiO<sub>2</sub>. *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya*, 22(1), 65–72. <http://jtk.unsri.ac.id>
- Almaguer, M. A., Cruz, Y. R., & da Fonseca, F. V. (2021). Combination of Advanced Oxidation Processes and Microalgae Aiming at Recalcitrant Wastewater Treatment and Algal Biomass Production: A Review. *Environmental Processes*, 8(2), 483–509. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00492-x>
- Ameta, R., Chohadia, A. K., Jain, A., & Punjabi, P. B. (2018). Fenton and Photo-Fenton Processes. In S. Ameta & R. Ameta (Eds.), *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 49–87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00003-6>
- Apriliani, M., Saputra, E., & Zultiniar. (2019). Pengolahan Limbah Cair Industri Pulp dan Kertas dengan Metode Advanced Oxidation Process Berbasis Sulphate Radical (Sr-AOP) Menggunakan Katalis Nitrogen-Doped Three-Dimensional Carbon Framework (3D NCF). *JOM FTEKNIK*, 6(1), 1–7. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/22858>
- AR, M. Y., Mulana, F., & Said, S. D. (2019). Effects of ultraviolet-enhanced ozonation on the degradation of ammonia and urea in fertilizer plant wastewater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536(1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012079>
- Augustia, V. A. S., Lestari, I. D., & Rani, M. D. (2018). Degradasi Limbah Zat Warna Direk Dengan Metode Advanced Oxidation Processes (AOPs) Kombinasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / MnO<sub>2</sub> dengan Parameter Uji BOD , COD dan pH. *Eksergi*, 15(1), 5–8.
- Ayuningtyas, E. (2020). Penurunan Kadar Warna dan Fenol Air Limbah Batik Menggunakan Metode Advanced Oxidation Processes (AOPs) Berbasis Ozon-GAC. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 20(2), 31–37. <https://journal.ity.ac.id/index.php/JRL/article/view/53/48>
- Azizah, M., & Humairoh, M. (2015). Analisis Kadar Amonia (NH<sub>3</sub>) dalam Air Sungai Cileungsi. *Jurnal Nusa Sylva*, 15(1), 47–54.
- Badan Pusat Statistik. (2021a). *Produk Domestik Bruto Indonesia Triwulanan*. Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik. (2021b). *Statistik Indonesia 2021*. Badan Pusat Statistik. <https://intip.in/StatistikIndonesia2021>
- Bañuelos, J. A., Rodríguez, F. J., Manríquez, J., Bustos, E., & Rodríguez, A. (2014). A review on arrangement and reactors for Fenton-based water treatment processes. In J. M. Peralta-Hernández, M. A. Rodrigo-Rodrigo, & C. A. Martínez-Huitle (Eds.), *Evaluation of Electrochemical Reactors as a New Way to Environmental Protection* (1st ed., pp. 97–137). Research Signpost.

- Bauer, R., Waldner, G., Fallmann, H., Hager, S., Klare, M., Krutzler, T., Malato, S., & Maletzky, P. (1999). The Photo-fenton Reaction and The TiO<sub>2</sub>/UV Process for Wastewater Treatment - Novel Developments. *Catalysis Today*, 53(1), 131–144. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00108-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00108-X)
- Bermúdez, L. A., Pascual, J. M., Martínez, M. D. M. M., & Poyatos Capilla, J. M. (2021). Effectiveness of Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment: State of the Art. *Water*, 13(15), 1–19. <https://doi.org/10.3390/w13152094>
- Borah, P., Kumar, M., & Devi, P. (2020). Recent trends in the detection and degradation of organic pollutants. In *Abatement of Environmental Pollutants* (pp. 67–79). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00003-5>
- Brienza, M., & Katsoyiannis, I. A. (2017). Sulfate Radical Technologies as Tertiary Treatment for the Removal of Emerging Contaminants from Wastewater. *Sustainability (Switzerland)*, 9(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su9091604>
- Cahyana, G. H., & Permadi, D. (2018). Pengolahan Air Limbah Laboratorium Menggunakan Metode AOPs (Advanced Oxidation Process) dengan Pereaksi Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan FeSO<sub>4</sub>) pada Skala Batch. *EnviroSan*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.31219/osf.io/hzv2r>
- Cesaro, A., Naddeo, V., & Belgiorno, V. (2013). Wastewater Treatment by Combination of Advanced Oxidation Processes and Conventional Biological Systems. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 4(8). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000208>
- Chuang, L., Chairuddin, & Sembiring, T. (2013). Penggunaan Sinar UV dan Hidrogen Peroksida untuk Menurunkan COD, TSS dan TDS Air Buangan Pabrik Oleokimia. *Jurnal Saintia Kimia*, 1(2), 1–7. <https://jurnal.usu.ac.id/index.php/skimia/article/view/1637>
- Cobianu, C., Dumbravescu, N., Serban, B.-C., Buiu, O., Romanitan, C., Comanescu, F., Danila, M., Marinescu, R., Avramescu, V., & Ionescu, O. (2020). Sonochemically synthesized ZnO-Graphene nanohybrids and its characterization. *Reviews On Advanced Materials Science*, 59(1), 176–187. <https://doi.org/10.1515/rams-2020-0013>
- Collins, A., & Bolton, J. (2016). *Advanced Oxidation Handbook* (First). American Water Works Association.
- Covinich, L. G., Bengoechea, D. I., Fenoglio, R. J., & Area, M. C. (2014). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment in the Pulp and Paper Industry: A Review. *American Journal of Environmental Engineering*, 4(3), 56–70. <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20140403.03>
- Darmadi. (2014). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Pupuk Urea Menggunakan Advanced Oxidation Processes. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.23955/rkl.v10i1.2166>

- Dewi, S. H., & Wardiyati, S. (2015). Optimasi Proses Degradasi Limbah Warna Oleh Katalis Heterogen  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  Menggunakan Metode Foto Fenton. *Prosiding Seminar Nasional XXIV " Kimia Dalam Industri Dan Lingkungan,"* 175–179. [https://www.researchgate.net/publication/301794636\\_OPTIMASI\\_PROSES\\_DEGRADASI\\_LIMBAH\\_WARNA\\_OLEH\\_KATALIS\\_HETEROGEN\\_Fe\\_3\\_O\\_4\\_SiO\\_2\\_MENGGUNAKAN\\_METODE\\_FOTO\\_FENTON](https://www.researchgate.net/publication/301794636_OPTIMASI_PROSES_DEGRADASI_LIMBAH_WARNA_OLEH_KATALIS_HETEROGEN_Fe_3_O_4_SiO_2_MENGGUNAKAN_METODE_FOTO_FENTON)
- Dianggoni, I., Saputra, E., & Pinem, J. A. (2017). Pengolahan Zat Warna Tekstil (Rhodamine B) dengan Teknologi AOP (Advance Oxidation Processes) Menggunakan Katalis Ce-Carbon Sphere dan Oksidan Peroxymonosulfate. *Jom FTEKNIK*, 4(2), 1–7.
- Elfiana, Rahmahwati, C. A., Zaini, H., & Fuadi, A. (2013). Kajian efektifitas reagen fenton untuk menurunkan konsentrasi cod air limbah domestik secara batch pada metode aop berbasis  $\text{H}_2\text{O}_2$ . *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 13(2), 57–59. [http://jurnal.pnl.ac.id/wp-content/plugins/Flutter/files\\_flutter/13914162327.ArtikelilmiahefitoTeknologi\\_2013\\_OK.pdf](http://jurnal.pnl.ac.id/wp-content/plugins/Flutter/files_flutter/13914162327.ArtikelilmiahefitoTeknologi_2013_OK.pdf)
- Enjarlis, & Hardi, J. (2010). Aplikasi Advance Oxidation Processes ( AOPs ) Berbasis  $\text{O}_3/\text{GAC}$  Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tapioka Pendahuluan Metodologi Penelitian. *Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo 2010*.
- Enrico. (2019). Dampak Limbah Cair Industri Tekstil Terhadap Lingkungan dan Aplikasi Tehnik Eco Printing sebagai Usaha Mengurangi Limbah. *Moda*, 1(1), 5–13.
- Ervina. (2018, March 6). Pengolahan Limbah Cair Pada Industri Dan Permasalahannya. *Bbkk.Kemenperin.Go.Id*. <http://bbkk.kemenperin.go.id/page/bacaartikel.php?id=eU3YJpVUfHOH2TRZcW3POF5OTx-UfuvlPdN2-IEPIT0>,
- Fadiyah, M. A., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2017). Pengolahan Lindi dengan Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP) dengan Variasi Debit Udara. *Reka Lingkungan*, 5(1), 1–9.
- Fauzi, A. R., & R., T. A. (2018). Kombinasi fenton dan Fotokatalis sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Batik. *JURNAL ENVIROTEK*, 10(1). <https://doi.org/10.33005/envirotek.v10i1.1166>
- Fernández de Dios, M. Á., Iglesias, O., Pazos, M., & Sanromán, M. Á. (2014). Application of Electro-Fenton Technology to Remediation of Polluted Effluents by Self-Sustaining Process. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/801870>
- Garrido-Cardenas, J. A., Esteban-García, B., Agüera, A., Sánchez-Pérez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Wastewater Treatment by Advanced Oxidation Process and Their Worldwide Research Trends. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010170>
- Gelardiansyah, S., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2015). Kelarutan Ozon pada Proses Ozonisasi Konvensional dan Advanced Oxidation Process ( $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ) pada Lindi Effluent Pengolahan. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 3(2), 1–10. <https://ejournal.itenas.ac.id/index.php/lingkungan/article/view/734>

- Ghime, D., & Ghosh, P. (2020). Advanced Oxidation Processes: A Powerful Treatment Option for the Removal of Recalcitrant Organic Compounds. In *Advanced Oxidation Processes - Applications, Trends, and Prospects* (pp. 1–12). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90192>
- Guerra-Rodríguez, S., Rodríguez, E., Singh, D., & Rodríguez-Chueca, J. (2018). Assessment of Sulfate Radical-Based Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment: A Review. *Water*, *10*(12), 1828. <https://doi.org/10.3390/w10121828>
- Hamad, D., Dhib, R., & Mehrvar, M. (2016). Photochemical Degradation of Aqueous Polyvinyl Alcohol in A Continuous UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Process: Experimental and Statistical Analysis. *Journal of Polymers and The Environment*, *24*(1), 72–83. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0750-2>
- Hasrul, Saputra, E., & Khairat. (2018). Pengolahan Limbah Cair Sawit dengan Metode AOP (Advanced Oxidation Process) Menggunakan Katalis Lamno<sub>3</sub> Perovskite dengan Variasi Oksidan Peroxymonosulfate. *Jom FTEKNIK*, *5*(1), 1–4. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/17040>
- Hassaan, M. A., & Nemr, A. El. (2017). Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, *2*(3), 85–93.
- Ikehata, K., & Li, Y. (2018). Ozone-Based Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 115–134). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00005-X>
- Jing, G., Luan, M., & Chen, T. (2016). Progress of Catalytic Wet Air Oxidation Technology. *Arabian Journal of Chemistry*, *9*, S1208–S1213. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.01.001>
- Jiyah, Sudarsono, B., & Sukmono, A. (2016). Studi Distribusi Total Suspended Solid (TSS) di Perairan Pantai Kabupaten Demak Menggunakan Citra Landsat. *Jurnal Geodesi Undip*, *6*(1), 41–47.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014, (2014).
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indoneisa Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, (2016).
- Khaliq, A. (2015). Analisis Sistem Pengolahan Air Limbah Pada Kelurahan Kelayan Luar Kawasan IPAL Pekapuran Raya PD PAL Kota Banjarmasin. *Jurnal POROS TEKNIK*, *7*(1), 1–53.
- Kolaczowski, S. ., Plucinski, P., Beltran, F. ., Rivas, F. ., & McLurgh, D. . (1999). Wet Air Oxidation: A Review of Process Technologies and Aspects in Reactor Design. *Chemical Engineering Journal*, *73*(2), 143–160. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(99\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00022-4)
- Krishnan, S., Rawindran, H., Sinnathambi, C. M., & Lim, J. W. (2017). Comparison of various advanced oxidation processes used in remediation of industrial wastewater laden with recalcitrant pollutants. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *206*(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012089>

- Kumar, V., Singh, K., & Shah, M. P. (2021). Advanced oxidation processes for complex wastewater treatment. In *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants* (pp. 1–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821011-6.00001-3>
- Kusuma, L., Darmadi, & Adisalamun. (2017). Pengolahan Limbah Cair Rumah Sakit secara Sonochemical. *Jurnal Litbang Industri*, 7(1), 29–39. <https://doi.org/10.24960/jli.v7i1.2691.29-39>
- Labola, Y. A., & Puspita, D. (2018). Peran Antioksidan Karotenoid Penangkal Radikal Bebas Penyebab Berbagai Penyakit. *Farmasetika.Com (Online)*, 2(2), 12–17. <https://doi.org/10.24198/farmasetika.v2i2.13668>
- Lee, M. J., Kim, T. H., Yoo, G. Y., Min, B. K., & Hwang, S. J. (2010). Reduction of sewage sludge by ball mill pretreatment and Mn catalytic ozonation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(5), 693–697. <https://doi.org/10.1007/s12205-010-0934-6>
- Lesu, W. S., Ali, M., & Rosariawari, F. (2020). Proses Fotofenton dalam Reaktor Resirkulasi untuk Menyisihkan Beban Pencemar pada Lindi. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 6(1), 54–65. <https://doi.org/10.20527/jukung.v6i1.8239>
- Linden, K. G., & Mohseni, M. (2014). 2.8- Advanced Oxidation Processes: Applications in Drinking Water Treatment. In S. Ahuja (Ed.), *Comprehensive Water Quality and Purification* (Vol. 2, pp. 148–172). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00031-1>
- Luck, F. (1999). Wet Air Oxidation: Past, Present and Future. *Catalysis Today*, 53(1), 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00112-1](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00112-1)
- Manos, D., Miserli, K., & Konstantinou, I. (2020). Perovskite and Spinel Catalysts for Sulfate Radical-Based Advanced Oxidation of Organic Pollutants in Water and Wastewater Systems. *Catalysts*, 10(11), 1299. <https://doi.org/10.3390/catal10111299>
- Marhaini, & Wibowo, H. S. (2016). Pengembangan Proses Oksidasi Tingkat Lanjut Menggunakan Fotokatalis TiO<sub>2</sub> dengan Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> untuk Pengolahan Limbah Cair Industri Pertambangan Batubara. *Distilasi*, 1(1), 51–56. <https://jurnal.um-palembang.ac.id/distilasi/article/view/904/800>
- Mazille, F., & Spuhler, D. (2013). *Advanced Oxidation Processes*. Sustainable Sanitation and Water Management. <https://sswm.info/advanced-oxidation-processes>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, (2016).
- Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (Fifth). McGraw-Hill Education.
- Mierzwa, J. C., Rodrigues, R., & Teixeira, A. C. S. C. (2018). UV-Hydrogen Peroxide Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 13–48). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00002-4>

- Mizuno, T., Han, F., Xu, J., Kusuda, Y., & Tsuno, H. (2018). Performance Evaluation of Ozonation and An Ozone/Hydrogen Peroxide Process Toward Development of A New Sewage Treatment Process—Focusing on Organic Compounds and Emerging Contaminants. *Ozone: Science & Engineering*, 40(5), 339–35. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1435110>
- Munter, R. (2001). Advanced Oxidation Processes-Current Status and Prospect. *The Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Chemistry*, 50, 58–80.
- Nasirian, M., & Mehrvar, M. (2018). Photocatalytic Degradation of Aqueous Methyl Orange using Nitrogen-doped TiO<sub>2</sub> Photocatalyst Prepared by Novel Method of Ultraviolet-assisted Thermal Synthesis. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 66, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.05.032>
- Nidheesh, P. V., & Gandhimathi, R. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*, 299, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.011>
- Oturan, N., & Oturan, M. A. (2018). Electro-Fenton Process: Background, New Developments, and Applications. In C. A. Martínez-Huitle, O. Scialdone, & M. A. Rodrigo (Eds.), *Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (1st ed., pp. 193–221). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00008-0>
- Pandis, P. K., Kalogirou, C., Kanellou, E., Vaitsis, C., Savvidou, M. G., Sourkouni, G., Zorpas, A. A., & Argirusis, C. (2022). Key Points of Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Wastewater, Organic Pollutants and Pharmaceutical Waste Treatment: A Mini Review. *ChemEngineering*, 6(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6010008>
- Paramo-Vargas, J., Camargo, A. M. E., Gutierrez-Granados, S., Godinez, L. A., & Peralta-Hernandez, J. M. (2015). Applying electro-Fenton process as an alternative to a slaughterhouse effluent treatment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.07.002>
- Patil, A. D., & Raut, P. D. P. D. (2014). Treatment of textile wastewater by Fenton's process as a Advanced Oxidation Process. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(10), 29–32. <https://doi.org/10.9790/2402-081032932>
- Patria, L., Maugans, C., Ellis, C., Belkhodja, M., Cretenot, D., Luck, F., & Copa, B. (2015). Wet air oxidation processes. In S. Parsons (Ed.), *Water Intelligence Online* (Vol. 4, pp. 247–249). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780403076>
- Pontas, K., & Muslim, A. (2015). Oxidation Process of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV for COD Reduction of Wastewater from Soybean Tofu Production. *Makara Journal of Technology*, 19(3), 120–126. <https://doi.org/10.7454/mst.v19i3.3043>
- Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., & Blaney, L. (2022). Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. *Journal of Environmental Management*, 316, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115295>
- Priyadi, A. R., & J. A. R., N. R. (2019). Penurunan Kadar COD dan Warna Limbah Industri Tekstil dengan Metode Elektro-fenton. *JURNAL ENVIROTEK*, 1(2), 14–23. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v1i12.9>

- Procházka, P., Tutter, Š., & Ditl, P. (2019). Electrochemically enhanced Fenton's reaction. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 1315–1320. <https://www.doi.org/10.3303/CET1974220>
- Putri, F. A., Sarto, & Yuliansyah, A. T. (2020). Pengaruh Variasi Rasio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / COD dan Tegangan Terhadap Penurunan COD Air Limbah Rumah Sakit dengan Metode Elektro – Fenton. *Jurnal Chemurgy*, 4(2), 15–23.
- Ray, S. S., Gusain, R., & Kumar, N. (2020). Water purification using various technologies and their advantages and disadvantages. In *Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification* (pp. 37–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821959-1.00003-9>
- Riandy, M. A., Saputra, E., & Pinem, J. A. (2018). Pengolahan Limbah Cair Sawit dengan Metode AOP (Advanced Oxidation Process) Menggunakan Katalis LaMnO<sub>3</sub> Perovskite dan Oksidan. *Jom FTEKNIK*, 5(1), 1–5. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/17031>
- Ristiawan, A., & Syafila, M. (2015). Kinetika Degradasi Lignin dari Limbah Cair Industri Pulp and Paper Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP) Dengan Kombinasi Ozon dan Hidrogen Peroksida. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 21(1), 48–56. <https://doi.org/10.5614/jtl.2015.21.1.6>
- Royani, S., Fitriana, A. S., Enarga, A. B. P., & Bagaskara, H. Z. (2021). Kajian COD dan BOD dalam Air di Lingkungan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah Kaliori Kabupaten Banyumas. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 13(1), 40–49. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol13.iss1.art4>
- Sapthu, A. (2013). Pengaruh Penanaman Modal dalam Negeri dan Penanaman Modal Asing terhadap Produk Domestik Bruto di Indonesia. *Cita Ekonomika Jurnal Ekonomi*, 7(1), 193–199.
- Setiawan, O., Sarto, & Cahyono, R. B. (2020). Pengaruh pH Umpan dan Rasio COD / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> terhadap Penurunan COD pada Limbah Cair Rumah Sakit melalui Metode Fenton. *Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, 1–6.
- Setyaningtyas, T., & Dwiasi, D. W. (2012). Degradasi Zat Warna Azo Tartrazin pada Limbah Cair Mie dengan Metode AOPs (Advanced Oxidation Processes). *Molekul*, 7(2), 153–162. <https://doi.org/10.20884/1.jm.2012.7.2.117>
- Sevimli, M. F. (2005). Post-Treatment of Pulp and Paper Industry Wastewater by Advanced Oxidation Processes. *Ozone: Science & Engineering*, 27(1), 37–43. <https://doi.org/10.1080/01919510590908968>
- Sholeh, M., Supraptiningsih, S., & Arsitika, W. P. (2013). Penurunan COD Air Limbah Industri Penyamakan Kulit menggunakan Reagen Fenton. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 29(1), 31–36. <https://doi.org/10.20543/mkkp.v29i1.216>
- Soeksmanto, A., Hapsari, Y., & Simajuntak, P. (2007). Kandungan Antioksidan pada Beberapa Bagian Tanaman Mahkota Dewa, *Phaleria macrocarpa* (Scheff) Boerl. (Thymelaceae) Antioxidant. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 8(2), 92–95. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d080203>

- Stasinakis, A. S. (2008). Use of Selected Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Wastewater Treatment - A Mini Review. *Global NEST Journal*, 10(3), 376–385. <https://doi.org/10.30955/gnj.000598>
- Suyasa, W. B. (2015). *Pencemaran Air & Pengolahan Air Limbah*. Udayana University Press.
- Torres-Palma, R. A., & Serna-Galvis, E. A. (2018). Sonolysis. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 177–213). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00007-3>
- Wardiyati, S., Hasnah, S. H., & Fisli, A. (2012). Dekolorisasi Limbah Industri Batik Menggunakan Proses Fenton dan Foto Fenton. *Indonesian Journal of Materials Science*, 14(2), 131–135. <http://jurnal.batan.go.id/index.php/jsmi/article/view/4434>
- Yu, R.-F., Chen, H.-W., Cheng, W.-P., & Hsieh, P.-H. (2009). Dosage Control of the Fenton Process for Color Removal of Textile Wastewater Applying ORP Monitoring and Artificial Neural Networks. *Journal of Environmental Engineering*, 135(5), 325–332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000016)
- Yudistira, D. R. (2022). Analisis Kualitas Air Limbah Kilang Sebelum Dibuang Ke Badan Air. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 12(1), 46–55. <https://doi.org/10.37525/sp/2022-1/326>
- Yulia, R., Meilina, H., Adisalamun, & Darmadi. (2016). Aplikasi Metode Advance Oxidation Process (AOP) Fenton pada Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.23955/rkl.v11i1.4098>
- Yuningrat, N. W., Gunamantha, I. M., & Wiratini, N. M. (2012). Degradasi Pencemar Organik dalam Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 1(2), 73–84.
- Zhou, L., Cao, H., Descorme, C., & Xie, Y. (2018). Phenolic Compounds Removal by Wet Air Oxidation Based Processes. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0970-2>
- Zulius, A. (2011). Perancangan dan Impelemntasi Informasi Data Sekolah pada Dinas Pendidikan Kota Lubuklinggau. *Jurnal Teknolohi Informasi Mura (Timur)*, 3(1), 57–75. <https://doi.org/10.32767/JTI.V3I1.73>



## LAMPIRAN

### Lampiran I. Dokumentasi



Unit Inlet dan Sedimentasi I IPAL  
RSUD Banyumas



Media Bioball pada *fluidized bed*  
*biofilter reactor* IPAL RSUD



Unit *fluidized bed biofilter reactor* IPAL RSUD





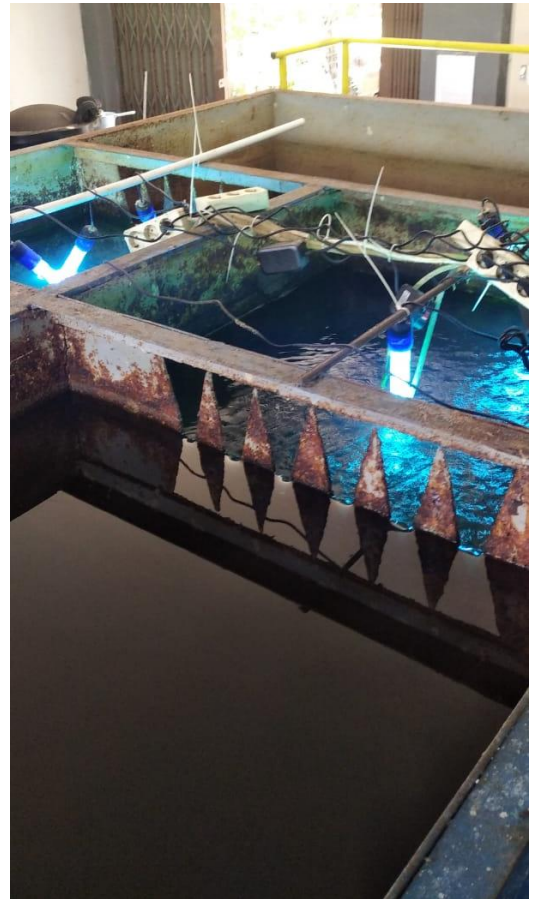
Unit Sedimentasi II IPAL RSUD  
Banyumas



Unit AOPs IPAL RSUD Banyumas



Unit AOPs Bak I IPAL RSUD  
Banyumas



Unit AOPs Bak II IPAL RSUD  
Banyumas





Unit Oulet IPAL RSUD Banyumas



Pengambilan sampel di RSUD Banyumas



Instalasi Pengolahan Lindi TPA Benowo



Instalasi Pembentukan Ozon TPA Benowo



Penyimpanan Hidrogen Peroksida TPA Benowo



Unit *Leachate Pond* IPL TPA Benowo





Unit AOPs IPL TPA Benowo



Unit Holding Tank IPL TPA Benowo



Unit Nanofilter IPL TPA Benowo



Unit *Multimedia Filter* IPL TPA Benowo



Pengambilan sampel di TPA Benowo



Pengecekan pH pada saat pengambilan sampel di TPA Benowo

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Malia Laila Nabila. Lahir di Wonosobo pada tanggal 29 September 1999, penulis merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Al-madina Wonosobo (2006-2012), SMP Sunan Averroes Yogyakarta (2012-2015) dan MAN Insan Cendekia Serpong (2015-2018). Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan FTSPK Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2018 melalui jalur SBMPTN dan terdaftar dengan NRP 032111840000076.

Semasa perkuliahan, penulis aktif di organisasi luar departemen yaitu sebagai staff Departemen Internal di UKM ITS Astronomy Club pada tahun 2019/2020 dan sebagai sekretaris Departemen Internal di UKM ITS Astronomy Club pada tahun 2020/2021. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan dalam lingkup departemen maupun Institut. Penulis pernah menjadi asisten laboratorium praktikum kimia lingkungan pada tahun 2021. Penulis juga mengikuti beberapa pelatihan yang diadakan baik oleh himpunan, departemen, maupun ITS dalam rangka pengembangan diri. Penulis dapat dihubungi melalui email [malialailanabila@gmail.com](mailto:malialailanabila@gmail.com).



UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR  
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)  
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02  
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing  
Ujian Tugas Akhir

Nilai TOEFL 487

Hari, tanggal : Rabu, 6 Juli 2022  
Pukul : 16.00-17.15  
Lokasi : TL-101  
Judul : Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Process (AOPs) Pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia  
Nama : Malia Laila Nabila  
NRP. : 03211840000076  
Topik : Studi Literatur

Tanda Tangan

Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1.	Literatur ditambahkan jangan dari hwb negara saja.
2.	

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing  
Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR  
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)  
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03  
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji  
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 6 Juli 2022  
Pukul : 16.00-17.15  
Lokasi : TL-101  
Judul : Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Process (AOPs) Pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia  
Nama : Malia Laila Nabila  
NRP. : 0321184000076  
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<p>keaja literatur: → ngolah info dari literatur. Cough → proses vs air uwal yg diolah → diurutkan dari tingkat kebuatan → &amp; Indonesia yg prospek aplikasinya bagus mana. - yg paling diaplikasikan di lapangan (pk lab)? - Studi Kasus - data teknis UO/UP; misal UV berapa watt, Ozon berapa L/min → di hubungkan dengan Removal efficiency - air uwal alahan up apa / kemana? - data kasus bandyhan.</p>

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.  
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana  
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Ervin Nurhayati, S.T., M.T., Ph.D

(  )

Dosen Pembimbing Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.

( )





UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR  
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)  
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03  
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji  
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 6 Juli 2022  
Pukul : 16.00-17.15  
Lokasi : TL-101  
Judul : Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Process (AOPs) Pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia  
Nama : Malia Laila Nabila  
NRP. : 03211840000076  
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Uraikan & definisi data primer & data sekunder → perbaiki di metode & Abstrak.
2	Catbel ⇒ kenapa AOP? apa beda dg OP? ⇒ kecenderungan di Indonesia kgnm?
3	Proses yg berkaitan dg radikal ⇒ bagaimana menghilangkan radikal dari proses!
4	Kelayakan / kecocokan metode AOP dg jenis limbah / kegiatan yg diolah!

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.  
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana  
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T.

(*Assomadi*)

Dosen Pembimbing Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.

( )



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN - ITS  
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR  
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)  
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03  
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji  
Ujian Tugas Akhir

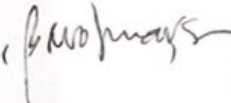
Hari, tanggal : Rabu, 6 Juli 2022  
Pukul : 16.00-17.15  
Lokasi : TL-101  
Judul : Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Process (AOPs) Pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia  
Nama : Malia Laila Nabila  
NRP. : 0321184000076  
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Kesimpulan 3 diperbaiki, masuk NF

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.  
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana  
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng.

Dosen Pembimbing Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D.

()  
( )





FORM FTA-03

## KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Malia Laila Nabila  
NRP : 03211840000076  
Judul : Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Process (AOPs)  
pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	23/12/2021	Asistensi mengenai rencana pemilihan topik tugas akhir	
2	05/01/2021	Asistensi mengenai penetapan topik tugas akhir yang diambil	
3	19/01/2022	Asistensi mengenai penentuan metode dan studi kasus yang diambil	
4	24/01/2022	Asistensi mengenai persiapan pengumpulan proposal tugas akhir	
5	02/02/2022	Asistensi mengenai pengerucutan topik dan pemilihan tempat studi kasus	
6	18/02/2022	Asistensi mengenai hasil revisi proposal tugas akhir berdasarkan seminar proposal	
7	12/05/2022	Asistensi mengenai sistem AOP, prinsip kerja dan efisiensi penurunan pencemar yang diterapkan di Indonesia serta studi kasus RSUD Banyumas	
8	01/06/2022	Asistensi mengenai penambahan skala dan karakteristik pada aplikasi AOP serta rencana pengambilan data pada TPA Benowo	
9	19/06/2022	Asistensi mengenai kelebihan dan kekurangan AOP secara umum, kelebihan dan kekurangan AOP pada masing-masing sistem, jenis limbah yang dapat diolah AOPs, posisi AOP pada pengolahan limbah, studi kasus TPA Benowo dan kesimpulan poin ke 3.	

Surabaya, 26 Juni 2022  
Dosen Pembimbing

Adhi Yuniarto ST., MT., Ph.D