



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

**Penurunan Konsentrasi COD Dan TSS Pada Limbah Cair
Laboratorium Dengan *Advanced Oxydation Processes* (AOPs)
Kombinasi Ozon (O₃) dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂)**

Lutfi Wulandari

21513134

Dosen Pembimbing:

Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

**Reduction of COD and TSS Concentrations in Laboratory
Wastewater Using Advanced Oxydation Processes (AOPs)
With a Combination of Ozon (O₃) and Hydrogen Peroxide
(H₂O₂)**

Lutfi Wulandari

21513134

Supervisor:

Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2025

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**


**Penurunan Konsentrasi COD Dan TSS Pada Limbah Cair Laboratorium
Dengan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Kombinasi Ozon (O₃) dan
Hidrogen Peroksida (H₂O₂)**

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

**Lutfi Wulandari
21513134**

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 11 September 2025 dan disetujui oleh:


Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.


(Pembimbing) 16/9'25

Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., I.P.M


(Penguji 1) 16/9'25

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.


(Penguji 2) 16/9'25

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana


Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.



PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 6 Agustus 2025

Yang membuat pernyataan,



Lutfi Wulandari

21513134

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia serta kemurahan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Penurunan Konsentrasi COD Dan TSS Pada Limbah Cair Laboratorium Dengan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Kombinasi Ozon (O₃) dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂)”. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik Lingkungan pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu selama proses penyusunan Tugas Akhir ini, baik dari segi materil maupun moril , terutama penulis ucapkan kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, nikmat serta kemudahan-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sulaiman dan Ibu Kamsiyah, yang dengan penuh kasih sayangnya telah memberikan dukungan, doa, dorongan serta nasihat yang sangat berarti bagi penulis.
3. Bapak Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing atas arahan, masukan, dan bimbingan yang sangat berharga selama proses penelitian dan penyusunan Tugas Akhir.
4. Bapak Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., I.P.M dan Ibu Puji Lestari, S. Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji atas saran dan arahan dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini.
5. Saudara dan saudari penulis yang telah memberikan saran, doa, serta menjadi tempat berbagi cerita penulis.
6. Seluruh dosen, staff dan keluarga besar Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu dan arahan dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini.

7. Teman-teman seperjuangan Teknik Lingkungan 2021, atas bantuan dan dukungan.
8. Seluruh staff laboratorium Teknik Lingkungan FTSP UII yang telah membantu dan memberikan masukan selama proses penelitian
9. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini

Sleman, 6 Agustus 2025

Lutfi Wulandari

**Penurunan Konsentrasi COD Dan TSS Pada Limbah Cair
Laboratorium Dengan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs)
Kombinasi Ozon (O₃) Dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂)**

Mahasiswa : Lutfi Wulandari
NIM : 21513134
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Kegiatan laboratorium umumnya menghasilkan limbah cair yang mengandung bahan organik dan anorganik, yang memiliki potensi untuk mencemari lingkungan jika tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan teknologi *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) dengan metode perokson, yaitu kombinasi antara O₃/H₂O₂. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi metode perokson dalam menurunkan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Total Suspended Solids* (TSS) pada limbah cair laboratorium. Pengolahan dilakukan dalam skala laboratorium dengan 5 variasi waktu ozonasi yaitu 15, 30, 45, 60 dan 90 menit serta 3 variasi dosis H₂O₂ yaitu 10, 20 dan 30 mL. Hasil pengolahan limbah menunjukkan efisiensi tertinggi pada waktu ozonasi selama 90 menit dan dosis H₂O₂ sebesar 30 mL, dengan penurunan konsentrasi COD sebesar 67%, dan penurunan konsentrasi TSS sebesar 85%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa teknologi AOPs metode perokson bekerja efektif dalam menurunkan konsentrasi parameter pencemar COD dan TSS pada air limbah laboratorium.

Kata kunci: AOPs, COD, perokson (O₃/H₂O₂), TSS

***Reduction of COD and TSS Concentrations in Laboratory
Wastewater Using Advanced Oxidation Processes (AOPs) with
a Combination of Ozone (O₃) and Hydrogen Peroxide (H₂O₂)***

Student : Lutfi Wulandari
Student Number : 21513134
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

Laboratory activities generally produce liquid waste containing organic and inorganic substances, which have the potential to pollute the environment if not properly treated. To address this issue, Advanced Oxidation Processes (AOPs) with the peroxone method, a combination of ozone (O₃) and hydrogen peroxide (H₂O₂), were used. This study aims to determine the efficiency of the peroxone method in reducing the concentration of Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Suspended Solids (TSS) in laboratory wastewater. The treatment was conducted on a laboratory scale with variations in ozone contact time and the dosage of hydrogen peroxide. Processing is carried out on a laboratory scale with 5 variations of ozonation time, namely 15, 30, 45, 60 and 90 minutes and 3 variations of H₂O₂ doses of 10, 20 and 30 ml. The results showed that the best treatment efficiency was achieved with an ozonation time of 90 minutes and an H₂O₂ dose of 30 mL, with a reduction in COD concentration by 67%, and a reduction in TSS concentration by 85%. Based on these results, it can be concluded that the AOPs using the peroxone method are effective in reducing COD and TSS pollutant parameters in laboratory wastewater.

Keywords: AOPs, COD, peroxone (O₃/H₂O₂), TSS

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
ABSTRAK.....	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Air Limbah Laboratorium.....	5
2.2 Teknologi Pengolahan Air Limbah Laboratorium	6
2.3 Parameter Kualitas Air Limbah	8
2.3.1 <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD).....	8
2.3.2 <i>Total suspended solid</i> (TSS).....	8
2.4 Baku mutu air limbah	9
2.5 <i>Advanced Oxidation Processes</i> (AOPs)	10
2.5.1 Jenis-Jenis Teknologi AOPs.....	11
2.5.2 Keunggulan dan Keterbatasan AOPs.....	13
2.6 Metode <i>Peroxone</i> (O_3/H_2O_2)	13
2.7 Penelitian Terdahulu	14
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Kerangka Penelitian.....	17
3.2 Pengumpulan Data.....	18
3.2.1 Jenis data.....	18
3.2.2 Waktu dan Lokasi	18

3.2.3	Variabel Penelitian.....	18
3.2.4	Pengujian Laboratorium	19
3.3	Analisis data.....	30
3.3.1	Konsentrasi COD.....	30
3.3.2	Konsentrasi TSS	30
3.3.3	Efisiensi penurunan COD dan TSS	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		32
4.1	Penjelasan Umum	32
4.1.1	Jenis dan Sumber Air Limbah	32
4.1.1	Karakteristik Air Limbah.....	33
4.2	Perhitungan kadar ozon	34
4.3	Hasil pengolahan limbah laboratorium dengan AOPs	36
4.3.1	Penurunan konsentrasi COD dengan menggunakan metode perokson dengan variasi waktu ozonasi (O_3) dan dosis H_2O_2	38
4.3.2	Penurunan konsentrasi TSS dengan menggunakan metode perokson dengan variasi waktu ozonasi dan dosis H_2O_2	40
4.3.3	Pengaruh AOPs metode perokson (O_3/H_2O_2) terhadap penurunan COD.....	41
4.3.4	Pengaruh AOPs metode perokson (O_3/H_2O_2) terhadap penurunan TSS	42
4.4	Pengaruh AOPs metode perokson terhadap kualitas air limbah laboratorium.....	43
BAB V PENUTUP		45
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	45
DAFTAR PUSTAKA		46
LAMPIRAN		51
Lampiran 1	Perhitungan.....	51
Lampiran 2	Analisis Data	54
Lampiran 3	Dokumentasi Penelitian.....	59
RIWAYAT HIDUP		64

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data Kualitas Air Limbah Laboratorium.....	6
Tabel 2. 2 Baku mutu air limbah berdasarkan Permen LHK No. 5 tahun 2014 untuk kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang ditetapkan.....	9
Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu.....	14
Tabel 4. 1 Karakteristik Air Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan UII	34
Tabel 4. 2 Hasil perhitungan kadar ozon dengan metode iodometri	35
Tabel 4. 3 Hasil pengolahan limbah cair metode perokson dengan 10 mL H ₂ O ₂	37
Tabel 4. 4 Hasil pengolahan limbah cair metode perokson dengan 20 mL H ₂ O ₂	37
Tabel 4. 5 Hasil pengolahan limbah cair metode perokson dengan 30 mL H ₂ O ₂	37

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Prosedur penelitian	17
Gambar 3. 2 Wadah pengenceran sampel 10 liter	20
Gambar 3. 3 Skema alat AOPs	21
Gambar 3. 4 Rangkaian alat AOPs	21
Gambar 3. 5 Skema alat perhitungan kadar ozon	22
Gambar 3. 6 Rangkaian alat perhitungan kadar ozon.....	22
Gambar 3. 7 Tahapan proses digestion larutan kerja.....	23
Gambar 3. 8 Tahapan pembuatan kurva kalibrasi	23
Gambar 3. 9 Kurva kalibrasi COD	24
Gambar 3. 10 Tahapan pembuatan larutan penjerap (Kalium Iodida)	24
Gambar 3. 11 Tahapan perhitungan dosis ozon.....	25
Gambar 3. 12 Rangkaian proses AOPs metode perokson	27
Gambar 3. 17 Tahapan pengujian awal COD air limbah.....	28
Gambar 3. 18 Tahapan pengujian TSS air limbah.....	29
Gambar 4. 1 sumber air limbah yang masuk ke jerigen 30 L.....	33
Gambar 4. 2 Kadar ozon (mg/L) berdasarkan waktu ozonasi	35
Gambar 4. 3 Kurva penurunan COD menggunakan AOPs metode perokson variasi waktu ozonasi O ₃ dan dosis H ₂ O ₂	38
Gambar 4. 4 Kurva penurunan TSS menggunakan AOPs metode perokson variasi waktu ozonasi dan dosis H ₂ O ₂	40
Gambar 4. 5 Persentase penurunan konsentrasi COD menggunakan AOPs metode perokson	42
Gambar 4. 6 Persentase penurunan konsentrasi TSS menggunakan AOPs metode perokson	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan	51
Lampiran 2 Analisis Data	54
Lampiran 3 Dokumentasi Penelitian	59

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam suatu institusi pendidikan, laboratorium merupakan suatu sarana penunjang dalam melakukan penelitian yang fungsinya untuk mewadahi mahasiswa dalam menyeimbangkan antara teori dan praktik yang didapat selama masa pendidikan. Laboratorium yang dalam aktivitasnya menghasilkan limbah yang berasal dari penggunaan larutan baku maupun sisa pencucian alat praktikum mengandung bahan organik dan anorganik yang dapat mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan baik. Beberapa parameter yang digunakan sebagai parameter pencemar air limbah adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD) (Dedi, 2024) dan *Total Suspended Solid* (TSS). Konsentrasi COD yang ada di dalam air limbah menunjukkan seberapa tingginya cemaran bahan kimia yang terkandung dalam air, yaitu semakin tinggi konsentrasi COD dalam air limbah menunjukkan semakin banyak cemaran yang bersifat kimia dalam air tersebut (Sari, 2019).

Penelitian terdahulu memperoleh data konsentrasi COD pada Laboratorium Kualitas Lingkungan Universitas Islam Indonesia sebesar 1.953,73 mg/L (Riniptosari, 2006) dan penelitian lain diperoleh konsentrasi COD sebesar 10.090 mg/L (Sari, 2019). Begitupula penelitian terdahulu mengenai konsentrasi TSS pada limbah Laboratorium yang pernah dilakukan, diperoleh konsentrasi TSS sebesar 367 mg/L (Azamia, 2012), konsentrasi 561 mg/L (Syafira, 2021) dan konsentrasi TSS sebesar 220 mg/L – 350 mg/L (Selamat, 2007).

Konsentrasi COD dan TSS limbah cair yang diperoleh pada penelitian terdahulu menandakan bahwa air limbah laboratorium mengandung konsentrasi COD dan TSS yang melebihi baku mutu yang berlaku, yang diatur dalam Permen LHK No. 5 Tahun 2014 tentang baku mutu air limbah yang lebih spesifik lagi mengenai air limbah yang belum memiliki baku mutu

yang ditetapkan yaitu COD berkisar 100-300 mg/L dan TSS berkisar 200-400 mg/L.

Air limbah laboratorium dengan nilai COD dan TSS tinggi, yang menandakan adanya kandungan bahan organik dan anorganik dalam air harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu untuk menghindari terjadinya pencemaran lingkungan. Pengolahan limbah dapat dilakukan dengan beberapa jenis pengolahan seperti pengolahan fisika yang meliputi filtrasi dan flotasi. Pengurangan nilai COD dapat pula dilakukan dengan pengolahan biologis seperti melalui proses aerobik dan anaerobik (Abdullah, 2024). Serta dapat dilakukan dengan pengolahan kimia seperti, koagulasi-flokulasi, adsorpsi dengan karbon aktif, elektrokoagulasi dan oksidasi kimia. Di dalam oksidasi kimia ada pengolahan dengan menggunakan metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), yaitu metode oksidasi yang lebih canggih atau dapat dikatakan dengan metode oksidasi lanjutan. Jenis-jenis AOPs meliputi AOPs menggunakan radiasi UV, yaitu O_3/UV , H_2O_2/UV , $O_3/H_2O_2/UV$, $Fe^{2+}/H_2O_2/UV$. Dan AOPs yang tidak menggunakan energi, yaitu Ozonasi dalam media alkali, Ozonasi dengan hidrogen peroksida (O_3/H_2O_2), hidrogen peroksida dan katalis Fe^{2+} (Fenton) (Sari, 2019). Salah satu dari metode AOPs yaitu proses oksidasi lanjutan kombinasi ozonasi dan hidrogen peroksida (O_3/H_2O_2) atau AOPs dengan metode *Peroxone*. Metode AOPs *Peroxone* melibatkan reaksi antara hidrogen peroksida (H_2O_2) dan Ozon (O_3) yang akan membentuk radikal hidroksil ($OH\bullet$) dan dapat mendegradasi kontaminan atau senyawa organik dalam air limbah secara efektif (Hamdaoui, 2024).

AOPs metode *Peroxone* dapat digunakan dalam pengolahan limbah industri untuk menurunkan konsentrasi COD, seperti yang dilakukan oleh (Sekaringgalih et al., 2023) dalam pengolahan limbah gelatin dan penelitian mengenai pengolahan limbah cair industri *pulp and paper* yang dilakukan oleh (Ristiawan & Syafila, 2015). Selain itu, AOPs metode *Peroxone* dapat digunakan untuk pengolahan TSS pada limbah industry MSG seperti yang dilakukan oleh (Imtiyas et al., 2016).

Pengolahan air limbah dengan AOPs metode *peroxone* atau berbasis O_3 dan H_2O_2 memiliki fungsi untuk mendegradasi kontaminan atau senyawa organik yang terdapat dalam air limbah. Selain itu, AOPs kombinasi O_3 dan H_2O_2 memiliki keunggulan lebih efisien, relatif murah dan aman dibandingkan metode lain seperti fenton. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengolah limbah cair laboratorium untuk menurunkan konsentrasi COD dan TSS yang terdapat dalam limbah cair menggunakan metode *Peroxone*.

1.2 Perumusan Masalah

Teknologi pengolahan limbah laboratorium sudah banyak dilakukan, namun penerapan teknologi AOPs metode perokson (O_3/H_2O_2) pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan, FTSP, UII masih sangat jarang dilakukan. Metode *peroxone* dengan kombinasi O_3 dan H_2O_2 mampu menghasilkan radikal hidroksil yang efektif dalam mendegradasi bahan organik dalam air limbah.

Dengan kemampuan metode perokson itu, dilakukan pengolahan air limbah dengan kandungan bahan organik yang tinggi untuk melihat apakah metode ini mampu menurunkan konsentrasi COD dan TSS serta untuk melihat efisiensi removal konsentrasi pada air limbah laboratorium.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Menghitung efisiensi penggunaan AOPs metode *peroxone* (O_3/H_2O_2) dalam penurunan konsentrasi COD dan TSS limbah cair Laboratorium.
2. Menguji variasi waktu ozonasi (O_3) dan dosis hidrogen peroksida (H_2O_2) yang optimal dalam menurunkan konsentrasi COD dan TSS pada limbah cair laboratorium.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan alternatif pengolahan limbah cair laboratorium untuk menurunkan konsentrasi COD dan TSS dengan AOPs metode *peroxone*.
2. Sebagai referensi kepada penelitian berikutnya agar mendapat data yang lebih lengkap tentang kemampuan AOPs metode *peroxone* dalam menurunkan COD pada air limbah laboratorium.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Sumber limbah cair yang digunakan adalah air limbah laboratorium Kualitas Lingkungan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta yang belum terolah
2. Periode sampel limbah yaitu pertengahan Januari 2025 – 20 April 2025 yang bersumber dari kegiatan pengujian dan pembilasan
3. Sampel limbah laboratorium merupakan sampel yang diencerkan 2 kali, dilakukan penyesuaian pH menjadi 8 dan tanpa melalui pre-treatment
4. Parameter yang diukur adalah parameter COD dan TSS
5. Metode yang digunakan adalah AOPs metode *peroxone* (O_3/H_2O_2)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Limbah Laboratorium

Laboratorium merupakan suatu ruangan yang digunakan untuk melakukan percobaan atau penelitian yang ditunjang dengan adanya alat-alat penelitian, laboratorium yang dalam penggunaannya berfungsi untuk menunjang berbagai penelitian ini tentunya akan menggunakan berbagai bahan kimia yang dikategorikan berbahaya sebagai bahan baku penelitian. Oleh karena itu, laboratorium yang dalam aktivitasnya menggunakan bahan kimia akan menghasilkan sisa dari kegiatan pengujian yang mengandung zat-zat berbahaya dan dapat menimbulkan berbagai dampak jika tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu, salah satu sisa dari kegiatan pengujian tersebut adalah limbah cair laboratorium yang terdiri dari bahan kimia senyawa organik dan anorganik (Sari, 2019). Meskipun laboratorium menghasilkan limbah dalam jumlah yang kecil, namun limbah tersebut dapat terakumulasi atau terjadinya penumpukan jumlah residu dan membahayakan makhluk hidup serta lingkungan hidup (Wijayanti et al., 2024).

Berdasarkan Peraturan pemerintah No. 22 tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, limbah laboratorium tergolong ke dalam limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Hal ini dikarenakan di dalam limbah laboratorium mengandung kandungan organik seperti COD, BOD, DO, TSS dan TDS. Sedangkan kandungan anorganik limbah laboratorium meliputi Sulfat, Nitrat, Nitrit, Amoniak dan Fosfat juga logam berat seperti logam Cd, Pb, Cu, Hg, Cr, Zn dan Fe (Anggraini et al., 2022).

Sebagai acuan untuk memahami karakteristik limbah cair laboratorium, disajikan data kualitas air limbah laboratorium dari beberapa referensi yang meliputi parameter COD, TSS dan pH. Penyajian data ketiga parameter kualitas air limbah laboratorium yang dipilih ini berhubungan dengan fokus penelitian, yaitu mengenai penurunan konsentrasi COD dan

TSS pada limbah laboratorium. Data lengkap dari berbagai referensi dapat dilihat ada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Data Kualitas Air Limbah Laboratorium

No	Penulis	Laboratorium	Parameter	Konsentrasi (mg/L)	Baku mutu (mg/L)
1	(Asriyati, 2006)	Kualitas Air, FTSP, UII	COD	1953	100 - 300
2	(Mulyani, 2006)	Kualitas Air, FTSP, UII	COD	1847	
3	(Azamia, 2012)	Laboratorium kimia	COD	2668	
4	(Majid & Sugito 2022)	Kimia Lingkungan, Universitas PGRI Adi Buana Surabaya	COD	27023	

2.2 Teknologi Pengolahan Air Limbah Laboratorium

Limbah cair laboratorium yang berasal dari aktivitas uji di laboratorium dapat dilakukan pengolahan dengan berbagai metode, seperti beberapa metode pengolahan yang sudah dilakukan oleh beberapa peneliti untuk menurunkan konsentrasi parameter pencemar lingkungan. (Audiana et al., 2017) melakukan penelitian mengenai pengolahan limbah cair laboratorium dengan kombinasi koagulasi dan adsorpsi dalam skala batch untuk menurunkan COD, besi (Fe), dan timbal (Pb). Proses koagulasi menggunakan koagulan tawas ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), dimana koagulan ini berfungsi untuk menurunkan kandungan bahan organik dan partikel koloid melalui mekanisme netralisasi muatan dan pembentukan flok yang dapat mengendap. Sedangkan, proses adsorpsi menggunakan zeolit dan karbon aktif yang berperan dalam penjerapan ion logam berat (Pb^{2+}) dan Fe^{2+} melalui pertukaran ion dan gaya *Van Der Waals*. Zeolit yang memiliki pori terbuka dan permukaan bermuatan negatif efektif mengikat ion logam Pb^{2+} , dan karbon aktif menyerap Fe^{2+} secara fisik melalui permukaan pori yang luas.

Lalu, penelitian lain dilakukan oleh (Djo et al., 2017) untuk menurunkan nilai COD dan kandungan logam berat tembaga (Cu) dan kromium (Cr) dengan metode fitoremediasi menggunakan tanaman eceng

gondok (*Eichhornia crassipes*). Fitoremediasi merupakan teknologi berbasis biologis yang memanfaatkan tanaman untuk menyerap dan mengakumulasi polutan dari air limbah. Yang mana dalam penelitian (Djo et al., 2017), digunakan eceng gondok untuk menurunkan konsentrasi COD serta logam berat Cu dan Cr. Mekanisme penurunan konsentrasi polutan tersebut dengan melibatkan akar tanaman dan mikroorganisme di sekitar akar yang membantu dalam oksidasi senyawa organik dan transformasi logam berat menjadi bentuk yang lebih mudah diserap. Serta, eceng gondok memiliki kemampuan membentuk senyawa fitokelatin dan metalloenzom yang berfungsi untuk mengikat logam dalam jaringan tanaman. Penelitian lain mengenai pengolahan limbah cair dilakukan oleh (Cahyana & Permadi, 2018), dimana dalam penelitian ini menggunakan pereaksi fenton, yaitu kombinasi H_2O_2 dan $FeSO_4$ dalam skala batch untuk mengolah air limbah dengan COD yang tinggi. AOPs berbasis fenton ini bekerja dengan membentuk radikal hidroksil ($\bullet OH$) yang sangat reaktif dan mampu mengoksidasi senyawa organik menjadi sederhana. Mekanisme fenton paling efektif dalam menurunkan COD yaitu pada pH 3 atau pH asam.

Beberapa pengolahan air limbah laboratorium teknik lingkungan, FTSP, UII yang pernah dilakukan yaitu menggunakan reaktor aerokarbonfilter untuk menurunkan konsentrasi COD yang dilakukan oleh (Mulyani, 2006) dan diperoleh % removal sebesar 15,09%. Lalu (Riniptosari, 2006) melakukan penelitian dalam menurunkan COD menggunakan reaktor elektrolisis dengan elektroda aluminium dan diperoleh % removal sebesar 35,38%. Dan penelitian lain dilakukan oleh (Asriyati, 2006) dalam menurunkan COD menggunakan reaktor elektrolisis dengan elektroda *stainless* dan diperoleh % removal sebesar 19,38 %.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, limbah laboratorium penting untuk dilakukan pengolahan guna memastikan konsentrasi pencemar memenuhi baku mutu yang berlaku sebelum dibuang ke lingkungan, sehingga tidak terjadinya pencemaran lingkungan akibat limbah yang dihasilkan oleh kegiatan laboratorium.

2.3 Parameter Kualitas Air Limbah

2.3.1 *Chemical Oxygen Demand (COD)*

Chemical Oxygen Demand (COD) atau kebutuhan oksigen kimia adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik secara kimia menjadi CO₂ dan H₂O. Dimana, COD merupakan salah satu parameter pengujian air limbah untuk mengetahui pencemaran di dalam air yang disebabkan oleh limbah organik (Cahyana & Permadi, 2018). Sumber COD pada limbah laboratorium, berasal dari tahapan penelitian yang menggunakan bahan kimia. Keberadaan COD di lingkungan dalam jumlah yang tinggi akan memberikan dampak pada manusia dan lingkungan, salah satunya yaitu banyaknya biota air yang mati, hal ini disebabkan konsentrasi oksigen terlarut dalam air terlalu sedikit dan mengganggu keseimbangan ekosistem (Lumaela et al., 2013).

Pada pengujian COD, bahan organik akan dioksidasi oleh kalium bikromat (K₂Cr₂O₇) sehingga menguraikan bahan limbah organik menjadi CO₂, H₂O. pada prinsipnya, pengujian COD dilakukan dengan adanya penambahan kalium dikromat dan asam sulfat pada sampel limbah, Kemudian, ditambahkan HgSO₄ untuk menghilangkan keberadaan ion klorida yang kemudian dilakukan refluks 2 jam pada suhu 150°C, yang mana dalam hal ini dilakukan refluks secara tertutup. (Torrejón et al., 2023).

Nilai COD dalam air limbah akan berkurang seiring dengan berkurangnya konsentrasi bahan organik yang terdapat dalam air limbah. Karena itu, nilai COD merupakan parameter bagi pencemaran air yang disebabkan oleh zat organik dan secara alamiah dapat dioksidasi dan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut. Oleh karena itu, konsentrasi COD dalam air limbah harus memenuhi standar baku mutu yang telah ditetapkan agar tidak mencemari lingkungan.

2.3.2 *Total suspended solid (TSS)*

Total Suspended Solid atau padatan tersuspensi total adalah jumlah partikel padat tersuspensi (melayang) dalam air dan tidak larut atau dapat

diartikan sebagai residu dari padatan total yang tertahan dalam saringan dengan ukuran partikel maksimal 2 μm atau lebih besar dari ukuran koloid. Partikel ini dapat berupa bahan organik maupun anorganik yang dapat menyebabkan kekeruhan air, seperti lumpur, tanah atau tanah liat, pasir halus, sisa bahan kimia padat yang tidak larut, sisa media kultur atau agar. (Harahap et al., 2020). Hal ini seperti yang dijelaskan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 6989.3:2019 bahwa padatan tersuspensi total (TSS) adalah residu dari padatan total yang tertahan oleh media penyaring.

2.4 Baku mutu air limbah

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, bahwa baku mutu air limbah adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau dilepas ke dalam media air dari suatu usaha dan/atau kegiatan. Dimana, baku mutu air ini digunakan sebagai acuan untuk mengendalikan kegiatan yang akan melakukan pembuangan limbah ke lingkungan agar memenuhi baku mutu pada setiap parameter pencemarnya. Baku mutu air limbah sesuai yang diatur dalam PERMEN LHK No. 5 Tahun 2014 dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 2 Baku mutu air limbah berdasarkan Permen LHK No. 5 tahun 2014 untuk kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang ditetapkan

Parameter	Satuan	Golongan	
		1	2
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	38	40
Zat padat terlarut (TDS)	mg/L	2.000	4.000
Zat padat suspensi (TSS)	mg/L	200	400
pH	mg/L	6-9	6-9
Besi terlarut (Fe)	mg/L	5	10
Mangan terlarut (Mn)	mg/L	2	5
Barium (Ba)	mg/L	2	3
Tembaga (Cu)	mg/L	2	3
Seng (Zn)	mg/L	5	10
Krom heksavalen (Cr^{6+})	mg/L	0.1	0.5
Krom total (Cr)	mg/L	0.5	1

Parameter	Satuan	Golongan	
		1	2
Cadmium (Cd)	mg/L	0.05	0.1
Air raksa (Hg)	mg/L	0.002	0.005
Timbal (Pb)	mg/L	0.1	1
Stanum (Sn)	mg/L	2	3
Arsen (As)	mg/L	0.1	0.5
Selenium (Se)	mg/L	0.05	0.5
Nikel (Ni)	mg/L	0.2	0.5
Kobalt (Co)	mg/L	0.4	0.6
Sianida (CN)	mg/L	0.05	0.5
Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0.5	1
Fluorida (F)	mg/L	2	3
Klorin bebas (Cl ₂)	mg/L	1	2
Amonia-nitrogen (NH ₃ -N)	mg/L	5	10
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	20	30
Nitrit (NO ₂ -N)	mg/L	1	3
Total nitrogen	mg/L	30	60
BOD ₅	mg/L	50	150
COD	mg/L	100	300
Senyawa aktif biru metilen	mg/L	5	10
Fenol	mg/L	0.5	1
Minyak & lemak	mg/L	10	20
Total bakteri koliform	MPN/100 mL	10.000	

2.5 *Advanced Oxidation Processes (AOPs)*

Dalam proses pengolahan air limbah ada suatu proses oksidasi tingkat lanjut yang disebut dengan AOPs. AOPs ini merupakan proses pengolahan air limbah dengan prosedur pengolahan secara kimia yang dirancang untuk mendegradasi bahan/zat organik yang ada dalam limbah dengan pembentukan dan penggunaan radikal hidroksil (OH•) yang berfungsi sebagai oksidator kuat melalui proses oksidasi (Wijayanti et al., 2024).

Proses oksidasi lanjutan (AOPs) ini mengacu pada serangkaian pengolahan air oksidatif yang biasa digunakan untuk mengolah limbah beracun di industri, rumah sakit, dan pabrik pengolahan air limbah. Pada umumnya, polutan organik akan berinteraksi dengan radikal hidroksil melalui jalur addisi atau abstraksi hidrogen, yang akan menghasilkan radikal yang berpusat pada karbon, dan kemudian bereaksi dengan molekul oksigen untuk

membentuk radikal peroksida, oleh demikian, akan menghasilkan sejumlah produk oksidasi seperti keton, aldehida, dan alkohol (Ameta, 2018).

Sedangkan, proses oksidasi konvensional adalah proses pengolahan air limbah yang menggunakan oksidator umum seperti klorin, ozon, atau kalium permanganat, yang dalam reaksinya, oksidan langsung menyerang polutan secara selektif. Sehingga, perbedaan dari proses oksidasi lanjutan dan proses oksidasi konvensional yaitu pada pembentukan radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$), serta pada selektivitas dari proses tersebut, pada AOPs oksidan non-selektif dan pada proses oksidasi konvensional oksidan selektif (tergantung oksidannya).

2.5.1 Jenis-Jenis Teknologi AOPs

Pengolahan air limbah dengan metode AOPs dibagi menjadi beberapa klasifikasi, menurut (Nur dkk, 2023) klasifikasi AOPs dibagi sebagai berikut:

1. AOP berbasis Ozon

Ozon digunakan sebagai oksidan dan disinfektan dalam pengolahan air. Dimana, reaksi ozon dengan air akan membentuk radikal hidroksil (OH) dan berbagai macam radikal lainnya seperti hidrogen peroksida (H_2O_2). Ozon sendiri dikombinasikan dengan metode lainnya agar diperoleh pengolahan air limbah yang lebih maksimal. Diantara kombinasi tersebut adalah:

1) Ozon dan hidrogen peroksida ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)

Penggunaan H_2O_2 bertujuan untuk menghasilkan radikal hidroksil yang lebih banyak. Namun, penggunaan H_2O_2 yang dikombinasikan dengan ozon untuk mengolah air limbah sangat terbatas, dikarenakan jika H_2O_2 masih dalam kadar yang tinggi terbuang ke lingkungan akan berbahaya.

2) Ozon dan katalis ($\text{O}_3/\text{Katalis}$)

Ozonasi katalitik dibedakan antara ozonasi homogen dan juga heterogen, hal ini tergantung pada kelarutan katalis dalam air. Ozonasi katalitik homogen dan heterogen telah menunjukkan

potensi pengolahan airnya pada skala laboratorium, namun pada skala penuh penerapannya masih terbatas.

2. AOPs berbasis UV

AOPs berbasis UV merupakan proses pengolahan dengan bantuan radiasi sinar UV dengan daya yang digunakan sebesar 200 mJ/cm², dengan daya sebesar ini mampu membunuh mikroorganisme patogen dan bakteri.

1) UV/ (H₂O₂)

AOPs kombinasi UV dan H₂O₂ paling sering digunakan, yang penggunaannya untuk menguraikan senyawa organik yang telah diterapkan pada skala laboratorium.

2) UV/O₃

Dalam proses UV/O₃ iradiasi UV menghasilkan pembelahan ozon terlarut dan diikuti oleh reaksi cepat atom oksigen dengan air untuk membentuk H₂O₂.

3. AOPs berbasis katalis

1) Proses fenton

Pada proses fenton adanya kombinasi antara besi (Fe) dan H₂O₂ pada kondisi asam yang akan menghasilkan pembentukan radikal hidroksil (HO). Dengan substitusi oksida besi dengan logam lainnya, maka akan meningkatkan penguraian senyawa organik. Yang mana fenton biasanya dilakukan pada larutan dengan kondisi asam untuk mencegah pengendapan besi.

2) AOPs fotokatalisis

Pada AOPs fotokatalistik digunakan sinar UV untuk mempercepat reaksi, dimana sinar UV ini mempercepat proses fenton dengan fotoreduksi besi (Fe). Proses foto-fenton yang dalam menguraikan senyawa organik akan menghasilkan penguraian yang tinggi, hal ini dikarenakan penyerapan UV yang tinggi dari Fe-polikarboksilat.

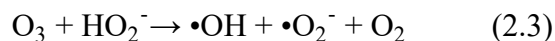
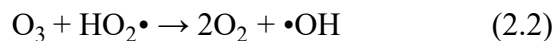
2.5.2 Keunggulan dan Keterbatasan AOPs

Proses oksidasi tingkat lanjut sangat efisien untuk mengolah berbagai polutan organik beracun dan kontaminan seperti racun alami, pestisida, pewarna, dan kontaminan berbahaya lainnya. Keunggulan dari AOPs yaitu memiliki potensi untuk mengurangi toksisitas, tidak perlu memusatkan limbah untuk pengolahan lebih lanjut menggunakan membrane atau adsorpsi karbon aktif, biayanya relative rendah dibandingkan dengan teknologi lain, radikal hidroksil dapat membantu dalam proses disinfeksi selama pengolahan air limbah bersamaan dengan degradasi senyawa organik. Namun, proses oksidasi lanjutan atau AOPs memiliki beberapa kelemahan, seperti penggunaan hidrogen peroksida (H_2O_2) yang dapat berbahaya bagi manusia, efisiensi proses tergantung pada dosis atau jumlah yang tepat untuk membentuk radikal hidroksil yang sesuai (Lupu et al., 2023).

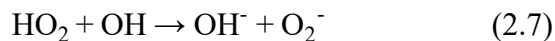
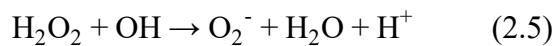
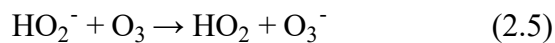
2.6 Metode *Peroxone* (O_3/H_2O_2)

Ozonasi merupakan metode oksidasi yang sangat kuat untuk pengolahan air limbah. Dalam ozonasi menunjukkan efisiensi pengolahan air limbah yang lebih tinggi pada pH yang lebih tinggi (Maulin P, 2021). Seperti yang dijelaskan (Kurniawan, 2006) bahwa nilai pH antara 8-9 akan mempercepat proses dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil, pada pH 12 akan terjadi dekomposisi yang sangat cepat. Reaksi antara ozon dan hidrogen peroksida dapat disebut dengan metode perokson, dimana perokson ini merupakan salah satu bagian dari AOPs yang menghasilkan radikal hidroksil yang reaktif terhadap polutan (Sekaringgalih et al., 2023). Grote (2012) dalam (Ristiawan & Syafila, 2015) menyebutkan kombinasi ozon (O_3) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) dapat menghasilkan penghilangan kontaminan dari air limbah secara praktis, aman dan biaya yang relatif murah. Dalam sistem ini, H_2O_2 berperan sebagai inisiator dalam mendekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil. Penambahan H_2O_2 dalam sistem ozonasi membuat proses dekomposisi ozon berjalan lebih cepat dan sangat efektif dalam mendegradasi kontaminan (Nabila & Yuniarto, 2024).

AOPs metode peroxone yang menggabungkan ozon (O₃) dan hydrogen peroksida (H₂O₂) akan menghasilkan radikal hidroksil, (Sekaringgalih et al., 2023) menjelaskan bahwa dalam pH basa, ion hidroperoksida bereaksi dengan ozon membentuk radikal hidroksil seperti pada persamaan 2.1 sampai 2.4.



Namun, dalam metode ini dapat terbentuk radikal scavanger, dimana H₂O₂ yang berlebihan akan menangkap radikal hidroksil dan mengganggu proses. Reaksi terbentuknya radikal scavanger, seperti yang dijelaskan oleh (Glaze et al., 1987) dapat dilihat pada persamaan 2.5 sampai 2.7.



2.7 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu mengenai penurunan konsentrasi COD pada air limbah menggunakan metode AOP berbasis O₃/H₂O₂ dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Hasil Penelitian
1	Sari, 2019	Dilakukan suatu penelitian skala laboratorium untuk menganalisa efisiensi penurunan parameter COD pada air limbah. Sampel yang digunakan merupakan sampel air limbah laboratorium dengan konsentrasi COD sebesar 10.090,09 mg/L. Setelah dilakukan pengolahan dengan menggunakan pereaksi fenton, efisiensi penurunan COD hanya sebesar 21,43%.
2	Wijayanti et al., 2024	Dilakukan suatu penelitian mengenai pengolahan air limbah laboratorium menggunakan AOP, dan sampel air limbah berasal dari air limbah UPT Laboratorium Terpadu Universitas Sriwijaya.

No	Penulis	Hasil Penelitian
		Konsentrasi air limbah laboratorium sebelum dilakukan pengolahan yaitu sebesar 240.000 mg/L, dan setelah dilakukan pengolahan dengan menggunakan reagen fenton diperoleh persentasi penurunan COD sebesar 99,98%.
3	Majid & Sugito, 2022	Konsentrasi awal air limbah laboratorium kimia lingkungan Universitas PGRI Adi Buana Surabaya untuk parameter COD yaitu sebesar 27.023 mg/L. Dilakukan pengolahan air limbah dengan parameter COD menggunakan elektrokoagulasi dengan variasi tegangan dan waktu kontak, diperoleh penurunan konsentrasi COD setelah pengolahan menjadi 2.670,83 mg/L, dimana persentase penurunannya sebesar 90,11%
4	Imtiyas et al., 2016	Konsentrasi awal limbah MSG untuk parameter COD diperoleh konsentrasi sebesar 260.000 mg/L. Setelah dilakukan pengolahan dengan metode AOP kombinasi O ₃ /H ₂ O ₂ diperoleh efisiensi penyisihan COD terbaik dengan penambahan H ₂ O ₂ 200 ml pada menit ke 120 dengan persentase 34,94% atau 169.167 mg/L. Dan hasil terbesar penurunan TSS terjadi pada proses kombinasi O ₃ /H ₂ O ₂ dengan penambahan H ₂ O ₂ 200 ml di menit ke 120 yaitu mencapai 99,14%.
5	Sekaringgalih et al., 2023	Proses AOP dengan kombinasi O ₃ /H ₂ O ₂ menunjukkan hasil terbaik pengolahan pada penambahan 30 ml hidrogen peroksida (H ₂ O ₂) pada waktu 160 menit, dimana dapat menurunkan COD sebesar 83,76% dari konsentrasi awal 1480,87 mg/L menjadi 240,39 mg/L.
6	Putri, 2016	Penggunaan ozon dalam mengolah limbah batik dengan konsentrasi COD awal yaitu 8252 mg/L. Dalam penelitian ini, sampel limbah dicampurka dengan larutan H ₂ O ₂ sebanyak 0,25 ml dan diozonasi dengan waktu kontak 1, 3, 6, dan 9 menit. Dari variasi waktu kontak ozonasi, diperoleh penurunan COD tertinggi pada waktu kontak 9 menit, yaitu sebanyak 42,14%.

Berdasarkan penelitian terdahulu, metode AOPs berbasis ozonasi (O₃/H₂O₂) terbukti efektif dalam menurunkan parameter pencemar COD pada limbah cair. Efektivitas penurunan COD dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti dosis hidrogen peroksida, waktu reaksi, dan konsentrasi awal COD.

Berdasarkan penelitian terdahulu, persentase penurunan konsentrasi COD yang tinggi diperoleh pada percobaan dengan konsentrasi COD air limbah awal yang tidak terlalu tinggi. Selain itu, efektivitas juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan limbah cair, seperti nilai pH dan karakteristik senyawa organik yang terkandung dalam air limbah.

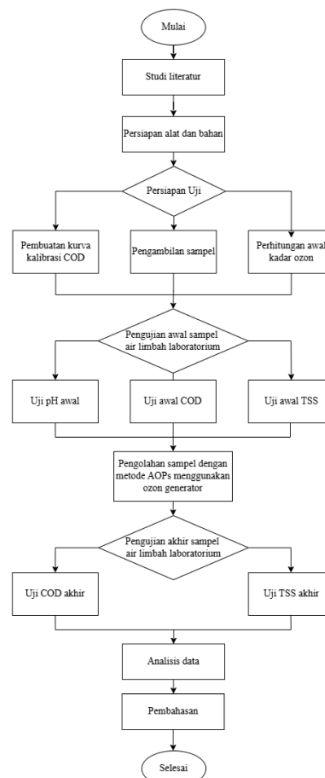
Kombinasi O_3 dan H_2O_2 digunakan karena dapat menghasilkan radikal hidroksil yang reaktif. Pada penelitian ini, dilakukan pengembangan terhadap studi terdahulu dengan fokus pada pengolahan air limbah Laboratorium dengan menggunakan metode AOPs berbasis ozonasi (O_3/H_2O_2).

BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian dalam penyusunan Tugas Akhir ini dimulai dengan mencari dan memahami studi literatur, yang kemudian masuk ke dalam penelitian di laboratorium untuk mengetahui penurunan konsentrasi COD dan TSS pada limbah cair laboratorium menggunakan AOPs metode perokson. Setelah penelitian di laboratorium selesai dilakukan, dilanjutkan dengan analisis data.

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian dalam penelitian ini disajikan dalam bentuk kuantitatif, dimana akan menjelaskan pengaruh ozonasi dan hidrogen peroksida (O_3/H_2O_2) dalam penurunan konsentrasi COD pada air limbah Laboratorium. Tahapan-tahapan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Prosedur penelitian

3.2 Pengumpulan Data

3.2.1 Jenis data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer dan data sekunder. Data-data primer yang digunakan, diperoleh dari kegiatan di laboratorium, data primer tersebut berupa data kurva kalibrasi, data dosis ozon terlarut, data konsentrasi COD dan TSS.

3.2.2 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Pengambilan sampel air limbah dilakukan di laboratorium yang sama. Dan pengujian parameter COD dilakukan berdasarkan SNI 6989.2:2019 tentang cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (*Chemical Oxygen Demand/COD*) dengan refluks tertutup secara spektrofotometri. Serta pengujian parameter TSS dilakukan berdasarkan SNI 6989.3:2019 tentang cara uji padatan tersuspensi total (*Total Suspended Solid/TSS*) secara gravimetri. Penelitian ini berlangsung dari bulan Maret 2025 hingga Agustus 2025.

3.2.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan objek yang menjadi fokus penelitian. Dimana, variabel penelitian terdiri dari beberapa jenis variabel, seperti variabel bebas (variabel independen) dan variabel terikat (variabel dependen) (Rachmawati et al., 2022).

3.2.3.1 Variabel bebas

Variabel bebas (Variabel independen) merupakan variabel yang mempengaruhi perubahan atau munculnya variabel terikat. Variabel bebas ini sering disebut dengan variabel stimulus atau variabel utama. Biasanya variabel bebas ini sengaja dikontrol, diamati, dan diukur untuk menentukan hubungan terhadap variabel lain, atau untuk melihat pengaruhnya

(Rachmawati et al., 2022). Dimana, dalam penelitian ini, variabel bebas berupa dosis Hidrogen peroksida (H_2O_2) dan durasi atau waktu ozonasi.

- Dosis hirogen peroksida (H_2O_2) : 10 mL, 20 mL, dan 30 mL.
- Waktu ozonasi (O_3) : 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit dan 90 menit.

3.2.3.2 Variabel terikat

Variabel terikat (variabel dependen) merupakan variabel yang dapat dipengaruhi oleh adanya variabel bebas atau parameter yang diukur sebagai hasil dari perubahan variabel bebas (Rachmawati et al., 2022). Dalam penelitian ini, variabel terikatnya adalah konsentrasi COD dan konsentrasi TSS.

3.2.4 Pengujian Laboratorium

Pengujian di Laboratorium dimulai dari persiapan alat dan bahan, pengolahan air limbah dengan metode perokson, hingga pada tahap akhir yaitu pembacaan nilai konsentrasi COD dan TSS pada air limbah.

3.2.4.1 Persiapan alat dan bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1280)
2. Ozon generator

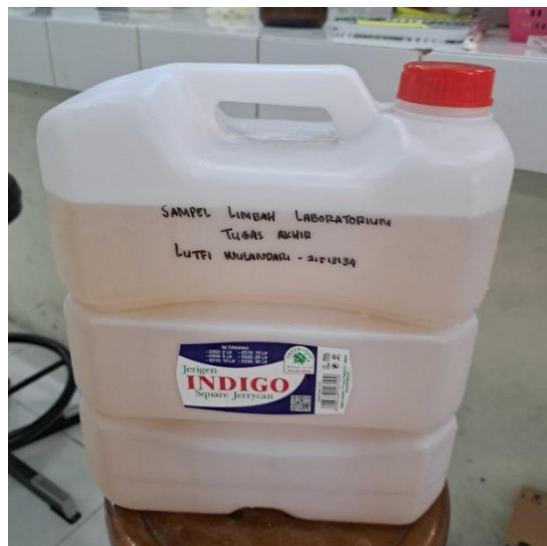
Ozon generator yang digunakan yaitu dengan merk IONTECH dengan model produk QJ-8005K dan memiliki kapasitas produksi ozon sebesar 10 gram per jam, beroperasi pada tegangan 220V dengan frekuensi 50 Hz, serta memerlukan daya sebesar 180 Watt. Dimensi fisik dari ozon generator ini adalah 320 x 260 x 580 mm, dengan nomor seri alat 168779. Sumber gas yang digunakan berasal dari udara sekitar (udara ambien).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Air limbah laboratorium
- b. Hidrogen peroksida (H_2O_2)
- c. Kalium Iodida (KI)

3.2.4.2 Persiapan wadah pengambilan sampel

Persiapan wadah pengambilan sampel dilakukan sesuai tahapan yang ada dalam SNI 6989.59:2008 tentang metode pengambilan sampel air limbah. Limbah yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah cair laboratorium kualitas lingkungan, FTSP, UII yang tersimpan dalam jerigen 30 liter. Sampel limbah yang akan digunakan diencerkan terlebih dahulu untuk mendapatkan konsentrasi limbah cair yang tidak terlalu tinggi. Sampel limbah yang diencerkan ini disimpan di dalam wadah sampel yang memenuhi syarat berdasarkan SNI 6989.59:2008, yaitu dapat ditutup dengan kuat dan rapat, bersih dan bebas kontaminan, serta tidak mudah pecah. Wadah sampel ini berupa jerigen 10 liter yang dapat dilihat pada Gambar 3.2.



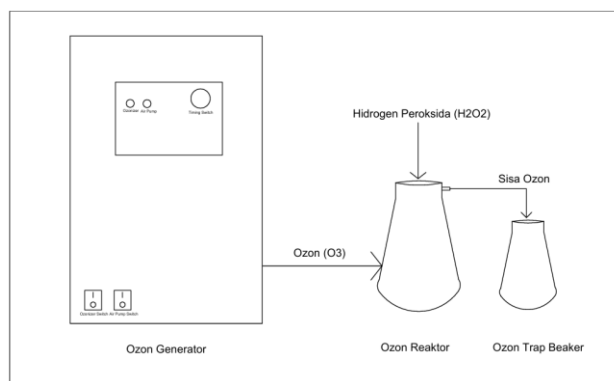
Gambar 3. 2 Wadah pengenceran sampel 10 liter

3.2.4.3 Persiapan bahan pengujian COD

Persiapan bahan dalam pengujian COD dilakukan sesuai tahapan yang ada dalam SNI 6989.2:2019 tentang cara uji kebutuhan COD dengan refluks tertutup secara spektrofotometri. Bahan-bahan yang dipersiapkan yaitu *digestion solution* untuk contoh uji dengan nilai COD tinggi, larutan pereaksi asam sulfat, dan larutan baku kalium hidrogen phatalat ($\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$, KHP) yang setara dengan nilai COD 1000 mg O_2/l .

3.2.4.4 Persiapan ozon generator

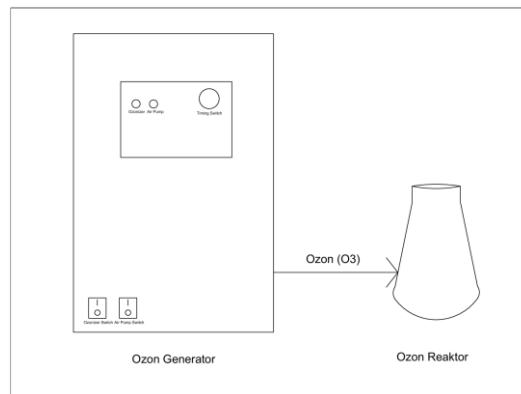
Persiapan ozon generator dalam penelitian ini dibagi menjadi 2, yaitu persiapan dalam uji untuk menghitung kadar ozon dari ozon generator, serta persiapan untuk pengolahan sampel limbah laboratorium dengan AOPs metode perokson. Perbedaan dari persiapan ini yaitu, terletak pada urutan rangkaian reaktor. Alur dalam menyiapkan ozon generator untuk menghitung kadar ozon yaitu dengan menyambungkan selang dari ozon generator dengan reaktor sebagai wadah larutan penjerap O_3 atau larutan Kalium Iodida (KI). Sedangkan, untuk proses pengolahan metode perokson yaitu dengan menyambungkan selang dari ozon generator dengan reaktor sebagai wadah air limbah, kemudian menyambungkan selang dari reaktor air limbah ke ozon trap beaker sebagai wadah larutan penjerap O_3 (larutan KI).



Gambar 3. 3 Skema alat AOPs



Gambar 3. 4 Rangkaian alat AOPs



Gambar 3. 5 Skema alat perhitungan kadar ozon

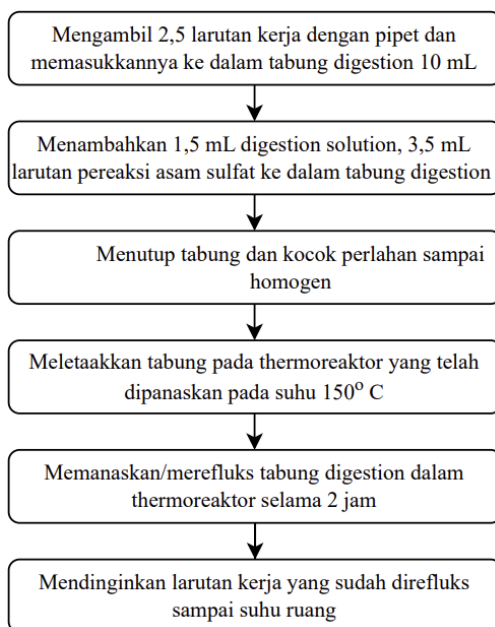


Gambar 3. 6 Rangkaian alat perhitungan kadar ozon

3.2.4.5 Pembuatan kurva kalibrasi

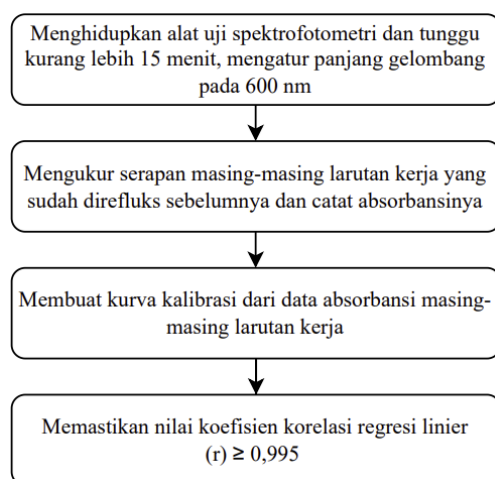
Pembuatan kurva kalibrasi COD dilakukan berdasarkan SNI 6989.2:2019 tentang cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (*chemical oxygen demand/COD*) dengan refluks tertutup secara spektrofotometri. Dimana dalam tahap ini, digunakan larutan kerja yang terbuat dari larutan induk KHP yang setara dengan nilai COD 1000 mg O₂/l. Dalam proses pembuatan kurva kalibrasi, dilakukan pengenceran terhadap larutan baku KHP, pengenceran ini dilakukan untuk menghasilkan larutan dengan rentang konsentrasi antara 100 mg/L hingga 900 mg/L. Pengenceran dilakukan dengan menggunakan rumus pengenceran ($M_1V_1=M_2V_2$) dan diencerkan dalam labu ukur 10 mL. Kemudian diukur serapan masing-masing larutan kerja menggunakan spektrofotometer. Pembuatan kurva kalibrasi dilakukan dengan proses digestion untuk larutan kerja dengan kadar COD 100 mg/L sampai 900 mg/l

sebelum dibaca dengan spektrofotometer. Tahapan lengkap proses digestion dapat dilihat pada Gambar 3.8.



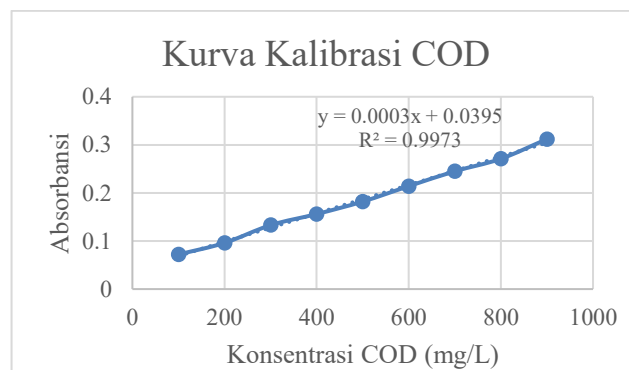
Gambar 3. 7 Tahapan proses digestion larutan kerja

Setelah dilakukan proses digestion hingga refluks, larutan kerja dilakukan pembacaan dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm untuk mendapatkan absorbansi dari masing-masing larutan kerja, dan kemudian dari absorbansi tersebut dapat dibuat kurva kalibrasi. Tahapan lengkap pembuatan kurva kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Tahapan pembuatan kurva kalibrasi

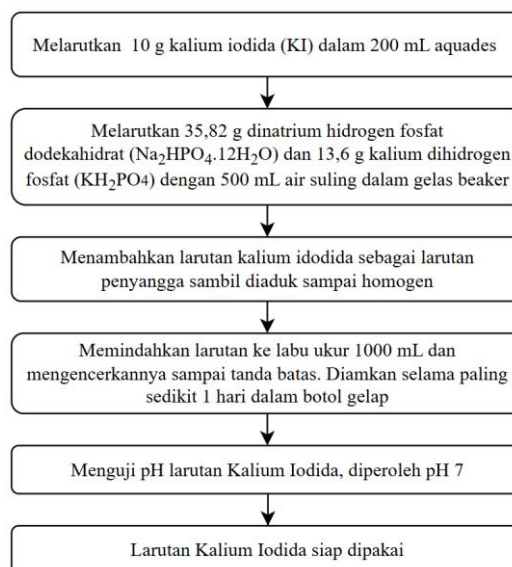
Nilai absorbansi dari masing-masing larutan kerja diplot terhadap konsentrasi untuk memperoleh kurva kalibrasi dan persamaan garis regresi liniernya. Dari persamaan garis lurus tersebut, didapat koefisien regresi linier (r) sebesar 0,9973, dimana koefisien ini menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara konsentrasi larutan kerja dan absorbansinya. Grafik kurva kalibrasi COD dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Kurva kalibrasi COD

3.2.4.6 Pembuatan larutan Penjerap (Kalium Iodida)

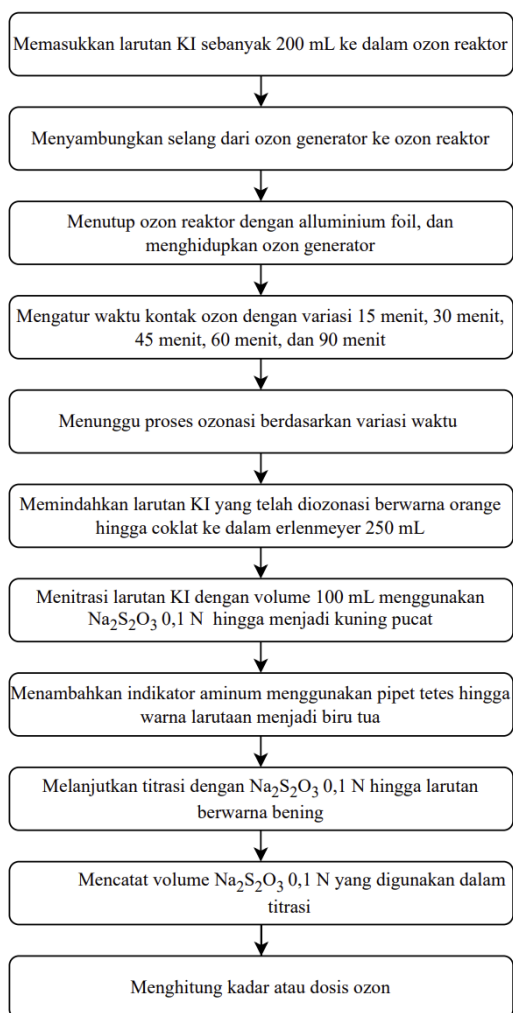
Pembuatan larutan penjerap O_3 dilakukan berdasarkan SNI 19-7119.8:2005 tentang cara uji oksidan dengan metoda *neutral buffer kalium iodida* (NBKI) menggunakan spektrofotometer. Alur pembuatan larutan penjerap dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Tahapan pembuatan larutan penjerap (Kalium Iodida)

3.2.4.7 Perhitungan dosis ozon

Perhitungan atau analisis dosis ozon yang dikeluarkan oleh ozon generator perlu untuk dilakukan terlebih dahulu sebelum dilakukannya pengolahan sampel limbah laboratorium menggunakan AOPs metode perokson (O_3/H_2O_2). Analisis dosis ozon ini diperlukan untuk mengetahui dosis ozon yang dikeluarkan dalam rentang waktu yang digunakan pada penelitian. Analisis dosis ozon dilakukan dengan menggunakan metode titrasi iodometri. Adapun langkah dalam analisis dosis ozon seperti yang dilakukan oleh (Munouwarah et al., 2023) dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Tahapan perhitungan dosis ozon

Perhitungan kadar ozon dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Kadar Ozon (mg)} = \left(\frac{1}{2} \times A \times N \times B\right) \dots (3.1)$$

$$\text{Kadar Ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{\frac{1}{2} \times A \times N \times B}{V} \dots (3.2)$$

Keterangan:

A : Volume titrasi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)

N : Normalitas $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

B : Mr O_3 (48)

V : Volume larutan KI (L)

3.2.4.8 Pengenceran sampel

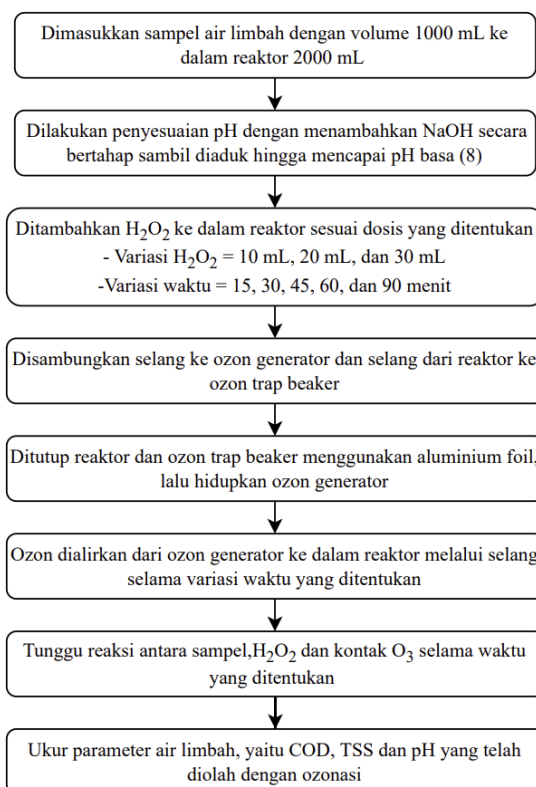
Pengenceran sampel limbah laboratorium dilakukan dengan pengenceran bertingkat untuk mengetahui konsentrasi parameter awal air limbah, khususnya COD. Pengenceran dilakukan karena berdasarkan perkiraan awal, konsentrasi COD pada limbah laboratorium memiliki konsentrasi yang cukup tinggi dan berpotensi melebihi rentang pembacaan alat uji atau kurva kalibrasi, sehingga dilakukan pengenceran bertingkat sebanyak 5 kali, 10 kali, dan 20 kali agar konsentrasi COD sampel limbah berada dalam rentang yang dapat diukur secara akurat.

Sampel yang diolah dengan proses *AOPs* diencerkan terlebih dahulu dengan pengenceran 2 kali, hal ini guna meningkatkan efisiensi *AOPs* dalam menurunkan COD sampel limbah. Dimana, dari COD limbah laboratorium dengan konsentrasi 8367 mg/L diencerkan sebanyak 2 kali, sehingga konsentrasi atau beban COD yang diolah pada proses *AOPs* metode perokson sekitar 4.000 mg/L. Kemudian, sampel yang telah melalui proses pengolahan *AOPs* dilakukan pengujian COD untuk mengetahui konsentrasi COD setelah adanya pengolahan limbah dengan *AOPs*. Dalam pengujian COD dengan spektrofotometer Uv-Vis, sampel diencerkan 10 kali, dengan cara mengambil 1 mL sampel dan ditambahkan 9 mL akuades dalam labu ukur 10 mL untuk memastikan COD masuk ke dalam rentang pembacaan alat dan kurva kalibrasi.

3.2.4.9 Rangkaian proses AOPs

Dalam rangkaian proses AOPs metode perokson, limbah laboratorium dengan pH awal 2 disesuaikan menjadi pH 8 dengan menambahkan NaOH 0,1 N secara bertahap hingga diperoleh pH basa (8), penyesuaian pH ini untuk mencapai kondisi optimum proses AOPs. Hal ini dikarenakan, kondisi pH optimum yang diperlukan dalam AOPs metode perokson yaitu pada kondisi basa. Nilai pH antara 8-9 akan mempercepat dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil dibandingkan dengan pH asam yang selektif dan terkadang berlangsung lambat, sedangkan, pada pH yang terlalu basa (12) akan terjadi dekomposisi yang sangat cepat (Kurniawan et al., 2006).

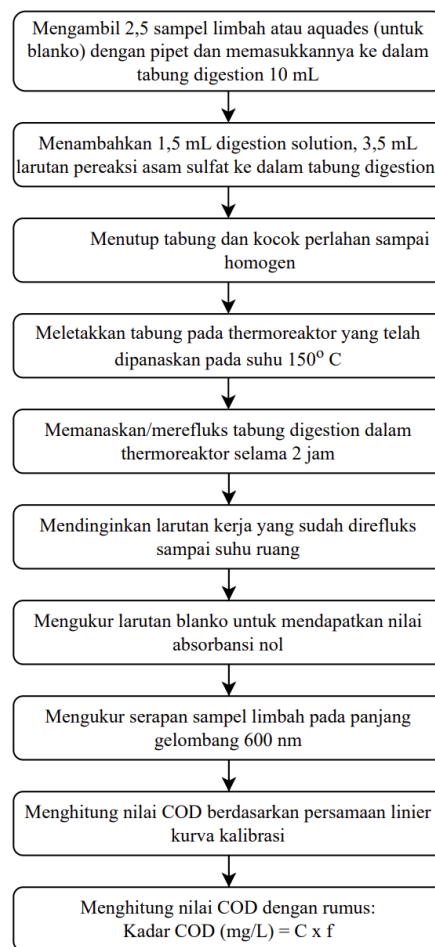
Setelah diperoleh pH yang diinginkan, sampel dilakukan pengolahan dengan AOPs metode perokson dengan menambahkan H_2O_2 sesuai dosis yang telah ditentukan dan kemudian dilakukan proses ozonasi dengan variasi waktu yang telah ditentukan. Rangkaian proses AOPs dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Rangkaian proses AOPs metode perokson

3.2.4.10 Pengujian COD sampel

Pengujian awal COD sampel limbah laboratorium dilakukan berdasarkan SNI 6989.2:2019. Pengujian sampel dilakukan dengan mengambil sebanyak 2,5 mL sampel yang sudah diencerkan sebelumnya, kemudian ditambahkan digestion solution serta larutan pereaksi asam sulfat ke dalam tabung digestion yang kemudian di refluks selama 2 jam. Tahapan pengujian COD sampel dapat dilihat pada Gambar 3.17.

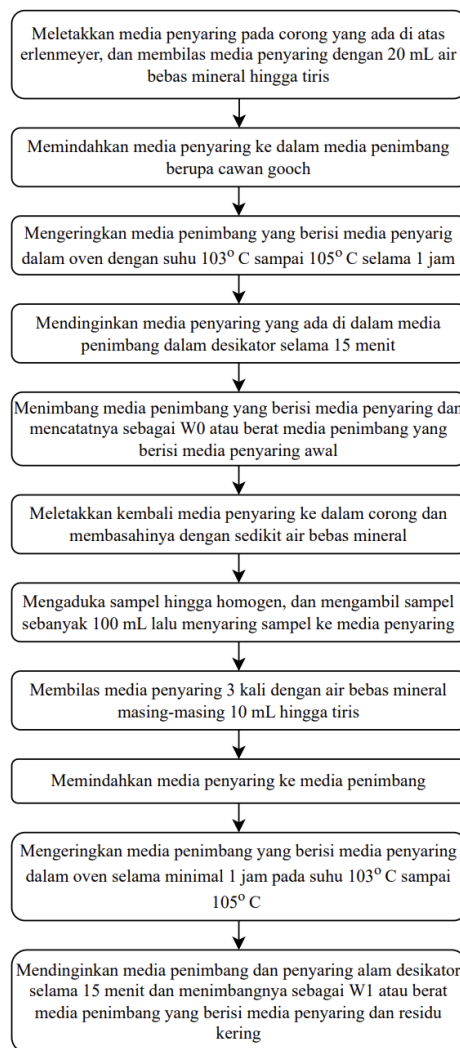


Gambar 3. 13 Tahapan pengujian awal COD air limbah

3.2.4.11 Pengujian TSS sampel

Pengujian TSS pada sampel limbah laboratorium dilakukan berdasarkan SNI 6989.3:2019 mengenai cara uji padatan tersuspensi total (*total suspended solid/TSS*) secara gravimetri. Langkah pengujian dilakukan dengan menyiapkan media saring yang kemudian dibilas dengan air bebas

mineral hingga tiris, kemudian media saring yang sudah dibilas dilakukan pengeringan dalam oven pada suhu 103°C sampai 105°C selama 1 jam. Lalu media pengering dimasukkan ke dalam desikator dan kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat awal. Setelah itu, media pengering dibasahi dengan sedikit air bebas mineral, dan sampel sebanyak 100 mL dimasukkan ke media penyaring hingga tiris. Media saring yang sudah dimasukin sampel dibilas dengan air bebas mineral sebanyak 3 kali. Media penyaring yang sudah tiris dikeringkan dalam oven selama minimal 1 jam pada suhu 103°C sampai 105°C. Dan kemudia dimasukkan ke dalam desikator dilanjutkan dengan ditimbang sebagai berat akhir. Tahapan pengujian COD sampel dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 14 Tahapan pengujian TSS air limbah

3.3 Analisis data

3.3.1 Konsentrasi COD

Untuk mengetahui konsentrasi COD pada sampel limbah, dilakukan pembacaan absorbansi menggunakan spektrofotometer dan kemudian, absorbansi yang terbaca dari sampel dimasukkan ke dalam regresi liner yang diperoleh dari kurva kalibrasi COD. Melakukan perhitungan menggunakan rumus yang terdapat di kurva kalibrasi. Nilai COD adalah nilai yang didapat dari pembacaan kadar sampel dari kurva kalibrasi, namun, pada penelitian ini dilakukan pengenceran sampel, sehingga perlu dihitung kembali konsentrasi COD berdasarkan persamaan berikut.

$$\text{Kadar COD } \left(\text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{l}} \right) = C \times f \dots (3.3)$$

Keterangan:

C = merupakan nilai COD sampel (mg/l)

F = merupakan faktor pengenceran sampel

3.3.2 Konsentrasi TSS

Untuk mengetahui konsentrasi TSS pada sampel limbah, dilakukan pembacaan berat media penyaring yang berisi residu dari sampel limbah. Konsentrasi TSS didapat dari berat media penyaring yang berisi residu kering dikurang berat media penyaring kosong. Persamaan untuk menghitung konsentrasi TSS sebagai berikut.

$$\text{TSS } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(W_1 - W_0) \times 1000}{V} \dots (3.4)$$

Keterangan:

W_0 = merupakan berat media penimbang yang berisi media penyaring awal (mg)

W_1 = merupakan berat media penimbang yang berisi media penyaring dan residu kering (mg)

V = merupakan volume sampel (ml)

1000 = merupakan konversi mililiter ke liter

Dikarenakan pada sampel ini dilakukan pengenceran, maka konsentrasi TSS yang didapat dari perhitungan menggunakan rumus dikali dengan pengenceran yang dilakukan.

$$\text{TSS} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \text{konsentrasi TSS} \times \text{faktor pengenceran} \dots (3.5)$$

3.3.3 Efisiensi penurunan COD dan TSS

Efisiensi penurunan konsentrasi COD dan TSS dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Efisiensi penurunan (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100\% \dots (3.6)$$

Keterangan:

C_0 merupakan konsentrasi awal (sebelum perlakuan AOPs)

C_t merupakan konsentrasi akhir (setelah perlakuan AOPs)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penjelasan Umum

Dilakukannya penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi AOPs dengan kombinasi Ozon (O_3) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) dalam menurunkan konsentrasi COD dan TSS pada limbah cair laboratorium. Dalam pengolahan air limbah, menerapkan tiga variasi dosis hidrogen peroksida dan lima variasi waktu ozonasi untuk mengetahui pengaruh terhadap penurunan konsentrasi COD dan TSS. Dari beberapa variasi tersebut, diharapkan akan diketahui efisiensi optimum AOPs metode perokson dalam menurunkan konsentrasi COD dan TSS pada air limbah laboratorium.

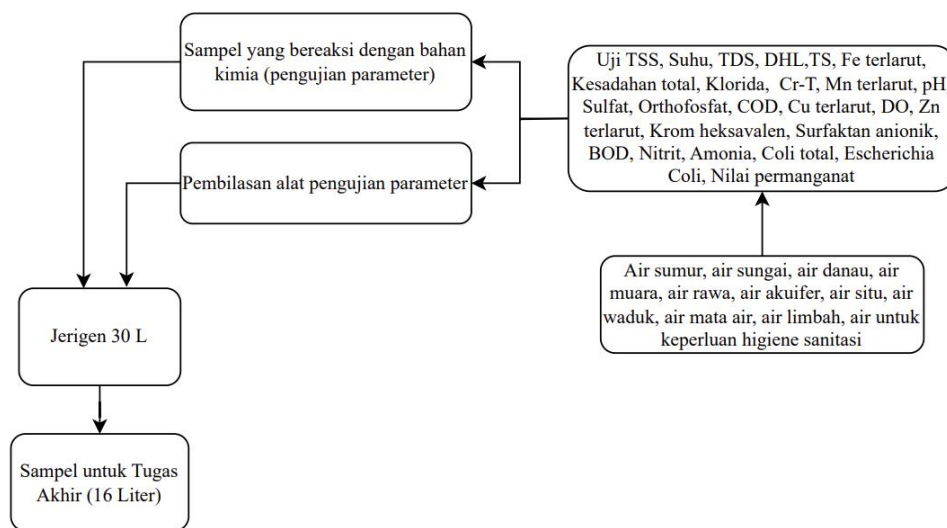
4.1.1 Jenis dan Sumber Air Limbah

Limbah cair laboratorium Kualitas Lingkungan, FTSP, UII jika diklasifikasikan berdasarkan sifatnya termasuk ke dalam kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), hal ini karena limbah cair yang dihasilkan berasal dari berbagai pengujian yang mengandung bahan kimia berbahaya, baik bagi kesehatan manusia maupun lingkungan. Karakteristik limbah cair laboratorium kualitas lingkungan FTSP, UII dibedakan dalam beberapa jenis, yaitu fisika, kimia, dan biologi. Jenis-jenis pengujian yang dilakukan di laboratorium kualitas lingkungan berdasarkan karakteristiknya meliputi pengujian:

1. Pengujian fisika : Suhu, kekeruhan, warna, padatan yang terdiri dari Total suspended solids (TSS) dan total dissolved solids (TDS).
2. Pengujian kimia : derajat keasaman (pH), kebutuhan oksigen kimiawi (COD), kebutuhan oksigen biokimia (BOD), logam berat seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), cadmium (Cd), besi (Fe), dan mangan (Mn).
3. Pengujian biologi : Total coli, *Escherichia coli* (E.Coli).

Sumber utama air limbah laboratorium kualitas lingkungan berasal dari aktivitas pengujian dan pembilasan peralatan yang digunakan dalam analisis

parameter pencemar dari berbagai jenis air permukaan seperti air sumur, air danau, air sungai, serta pengujian air limbah. Limbah cair yang dihasilkan dari berbagai aktivitas tersebut berwarna coklat keorenan dan disimpan di tempat penampungan berupa jerigen berkapasitas 30 L dengan penutup rapat. Dimana, proses penampungan limbah dilakukan dengan cara mengisi jerigen 30 L hingga penuh. Setelah penuh, jerigen tersebut disimpan di ruang penyimpanan limbah. Dalam praktiknya, setiap 1 jerigen 30 L akan terisi penuh dalam kurun waktu sekitar 3 bulan. Untuk limbah cair laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini digunakan limbah cair yang berada dalam 1 jerigen berkapasitas 30 L dengan usia sekitar 3,5 bulan, dengan periode awal limbah masuk pada pertengahan januari 2025 dan limbah terakhir masuk pada tanggal 20 april 2025.



Gambar 4. 1 sumber air limbah yang masuk ke jerigen 30 L

4.1.1 Karakteristik Air Limbah

Karakteristik air limbah laboratorium ditentukan dengan uji COD berdasarkan SNI 6989.2:2019 dengan refluks tertutup secara spektrofotometri dan uji TSS berdasarkan SNI 6989.3:2019 secara gravimetri. Limbah laboratorium ini mengandung campuran berbagai bahan kimia, termasuk bahan organik, senyawa anorganik, dan memungkinkan adanya logam berat. Berdasarkan analisis karakteristik awal air limbah, konsentrasi

COD pada limbah laboratorium menunjukkan konsentrasi yang sangat tinggi, yaitu sekitar 8367 mg/L, dimana nilai ini menandakan kandungan bahan organik yang tinggi dalam air limbah. Selain itu, konsentrasi TSS juga melebihi batas baku mutu yang ditetapkan dalam regulasi, yaitu memiliki konsentrasi sekitar 735 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa air limbah laboratorium teknik lingkungan UII memiliki beban pencemar yang tinggi dan memerlukan suatu pengolahan lanjut. Baku mutu dibandingkan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 untuk baku mutu air limbah bagi kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang ditetapkan. Pada Tabel 4.1 menunjukkan konsentrasi karakteristik parameter pencemar berupa COD dan TSS melebihi baku mutu sesuai dengan regulasi yang berlaku.

Tabel 4. 1 Karakteristik Air Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan UII

No.	Parameter	Satuan	Konsentrasi	Baku mutu
1	COD	mg/L	8367	100 - 300
2	TSS	mg/L	735	200 - 400
3	pH	-	2	6-9

(Sumber: Data Primer, 2025)

4.2 Perhitungan kadar ozon

Dalam penelitian ini, setelah melakukan uji pendahuluan untuk mengetahui konsentrasi awal parameter COD dan TSS pada limbah cair laboratorium kualitas lingkungan, FTSP, UII. Dilanjutkan dengan melakukan perhitungan kadar ozon yang dikeluarkan oleh ozon generator per waktu, kadar ozon dihitung menggunakan titrasi iodometri seperti yang dilakukan oleh (Munouwarah et al., 2023). Prinsip dari metode ini yaitu memanfaatkan ozon (O_3) sebagai oksidator kuat untuk mengoksidasi ion iodida (I^-) menjadi iodin (I_2). Dimana, dalam metode ini, larutan kalium iodida (KI) berguna sebagai larutan penjerap oksidan (O_3) yang kemudian dititrasi menggunakan larutan $Na_2S_2O_3$ 0,1 N hingga larutan berubah warna menjadi pucat dan dilakukan penambahan amilum hingga berubah warna menjadi biru tua, kemudian dilanjutkan titrasi hingga menjadi bening. Untuk pembuatan

larutan penjerap dan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N serta standarisasi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N dilakukan berdasarkan SNI 19-7119.8-2005 tentang cara uji kadar oksidan dengan metoda neutral buffer kalium iodida (NBKI).

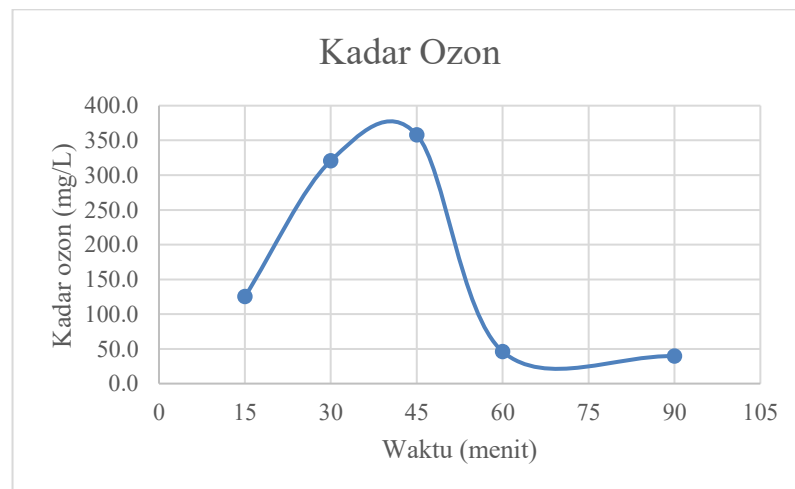
Perhitungan kadar ozon dilakukan berdasarkan waktu ozonasi yang ditentukan untuk proses AOPs metode perokson, ada 5 variasi waktu ozonasi yaitu 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit dan 90 menit. Dilakukan standarisasi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N, dan diperoleh volume titrasi 26,8 mL, dan normalitas $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ setelah standarisasi adalah 0,092 N. Data yang diperoleh dari metode iodometri dalam menghitung kadar ozon dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil perhitungan kadar ozon dengan metode iodometri

Waktu (Menit)	Volume KI (mL)	Volume titrasi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)	Kadar ozon (mg)	Kadar ozon (mg/L)	Kadar ozon (g/mL)
15	100	5.7	12.52	0.12521	125.2
30	100	14.6	32.07	0.32073	320.7
45	100	16.3	35.81	0.35807	358.1
60	100	2.1	4.61	0.04613	46.1
90	100	1.8	3.95	0.03954	39.5

(Sumber: Data Primer, 2025)

Grafik yang menunjukkan hubungan antara waktu kotak dan kadar ozon dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 2 Kadar ozon (mg/L) berdasarkan waktu ozonasi

Dari grafik di atas, kadar ozon mengalami peningkatan pada menit ke-15 hingga mencapai puncak pada menit ke 45 dan mengalami penurunan tajam pada menit ke-60. Peningkatan ini menunjukkan semakin lama ozon dialirkan, semakin banyak ozon terlarut dalam larutan, hingga mencapai titik jenuh. Dari data diketahui bahwa setelah menit ke-45 atau semakin lama waktu ozonasi, maka ozon yang terbentuk cenderung semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin lamanya waktu ozonasi, semakin besar kemungkinan untuk iodin (I_2) terlepas keluar atau ke udara, hal ini mengartikan bahwa ozon tidak sempat bereaksi dengan larutan KI, sehingga ozon tidak terhitung (Munouwarah et al., 2023).

Perhitungan kadar ozon ini dilakukan untuk mengetahui berapa kadar ozon terlarut yang tersedia per waktu yang ditentukan, atau dapat dikatakan untuk mengetahui bagaimana tren kadar ozon terlarut yang dihasilkan oleh ozon generator seiring waktu. Namun, kadar ozon terlarut tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan konsentrasi COD dan TSS dalam metode perokson. Hal ini dikarenakan efektivitas proses perokson tidak hanya bergantung pada banyaknya ozon, namun pada interaksi antara ozon dan hidrogen peroksida dalam membentuk radikal hidroksil yang merupakan oksidator utama.

4.3 Hasil pengolahan limbah laboratorium dengan AOPs

Pengolahan limbah cair laboratorium pada penelitian ini menggunakan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) dengan kombinasi ozon (O_3) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) atau biasa disebut dengan metode perokson. Dalam proses ini, terjadi reaksi antara ozon dan hidrogen peroksida yang menghasilkan radikal hidroksil yang sangat reaktif. Radikal hidroksil ini berperan sebagai oksidator yang sangat kuat karena memiliki kemampuan oksidasi untuk menghilangkan atau menghancurkan senyawa organik yang sulit dioksidasi oleh oksidan konvensional (Hassan et al, 2020).

Analisis konsentrasi COD pada limbah cair laboratorium menggunakan instrumen Spektrofotometri UV-Vis dengan panjang

gelombang 600 nm. Sedangkan, untuk analisis konsentrasi TSS menggunakan metode gravimetri dengan media penyaring Whatman Grade 42 dengan ukuran pori-pori 4,2 μm . Hasil pengolahan limbah cair laboratorium dengan menggunakan AOPs metode perokson dapat dilihat pada Tabel 4.3 sampai 4.5.

Tabel 4. 3 Hasil pengolahan limbah cair metode perokson dengan 10 mL

H_2O_2

Waktu (menit)	Dosis H_2O_2 (mL)	pH			COD sebelum AOPs	COD sesudah AOPs	% removal	TSS sebelum AOPs	TSS sesudah AOPs	% removal
		Awal	Awal (penyesuaian)	akhir						
15	10	2	8	6	8367	3650	56%	586	427	27%
30			8	6		2817	66%		428	27%
45			8	6		4417	47%		363	38%
60			8	6		4733	43%		311	47%
90			8	5		3333	60%		146	75%

(Sumber: Data Primer, 2025)

Tabel 4. 4 Hasil pengolahan limbah cair metode perokson dengan 20 mL

H_2O_2

Waktu (menit)	Dosis H_2O_2 (mL)	pH			COD sebelum AOPs	COD sesudah AOPs	% removal	TSS sebelum AOPs	TSS sesudah AOPs	% removal
		Awal	Awal (Penyesuaian)	akhir						
15	20	2	8	6	8367	5517	34%	586	398	32%
30			8	6		4900	41%		424	28%
45			8	6		5367	36%		305	48%
60			8	6		4533	46%		284	52%
90			8	5		4000	52%		151	74%

(Sumber: Data Primer, 2025)

Tabel 4. 5 Hasil pengolahan limbah cair metode perokson dengan 30 mL

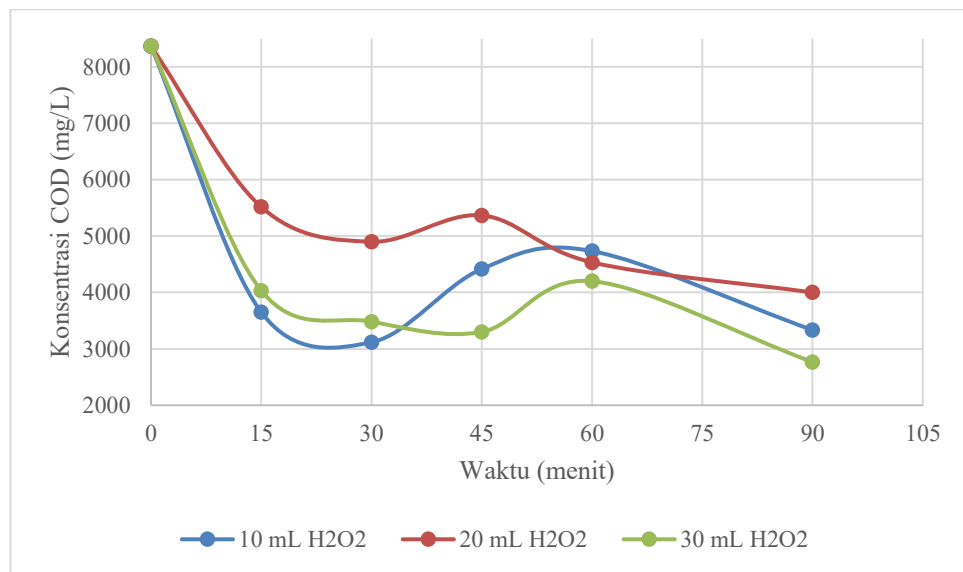
H_2O_2

Waktu (menit)	Dosis H_2O_2 (mL)	pH			COD sebelum AOPs	COD sesudah AOPs	% removal	TSS sebelum AOPs	TSS sesudah AOPs	% removal
		Awal	Awal (Penyesuaian)	akhir						
15	30	2	8	6	8367	4033	52%	586	347	41%

30		8	6	3483	58%	379	35%
45		8	6	3300	61%	284	52%
60		8	6	4200	50%	240	59%
90		8	5	2767	67%	86	85%

4.3.1 Penurunan konsentrasi COD dengan menggunakan metode perokson dengan variasi waktu ozonasi (O₃) dan dosis H₂O₂

Penurunan konsentrasi COD pada limbah cair laboratorium yang sudah disesuaikan menjadi pH 8 dengan AOPs menggunakan metode perokson dengan variasi waktu selama 15, 30, 45, 60 dan 90 menit untuk mendapatkan waktu optimum dalam menurunkan nilai COD. Dalam proses ini, sampel dicampur dengan larutan hidrogen peroksida (H₂O₂) 50% dengan 3 variasi dosis, yaitu sebesar 10, 20 dan 30 mL. Hasil pengujian nilai COD sebelum dan sesudah perlakuan AOPs dilakukan menggunakan metode refluks tertutup secara spektrofotometri berdasarkan SNI 6989.2:2019. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Kurva penurunan COD menggunakan AOPs metode perokson variasi waktu ozonasi O₃ dan dosis H₂O₂

Hasil penelitian pada proses AOPs metode perokson (O₃/H₂O₂) yang ditunjukkan dalam gambar 4.3 menjelaskan bahwa penurunan nilai COD terhadap waktu ozonasi dengan 3 variasi dosis H₂O₂ mengalami fluktuasi. Namun, pengolahan limbah menggunakan AOPs metode perokson ini,

terbukti mampu menurunkan beban pencemar COD dari limbah laboratorium. Dari semua variasi dosis dan waktu, penurunan nilai COD tertinggi terjadi pada waktu ozonasi selama 90 menit dengan dosis H_2O_2 sebesar 30 mL, yaitu dari 8.367 mg/L menjadi 2.767 mg/L yang dapat dilihat pada lampiran 1.3.

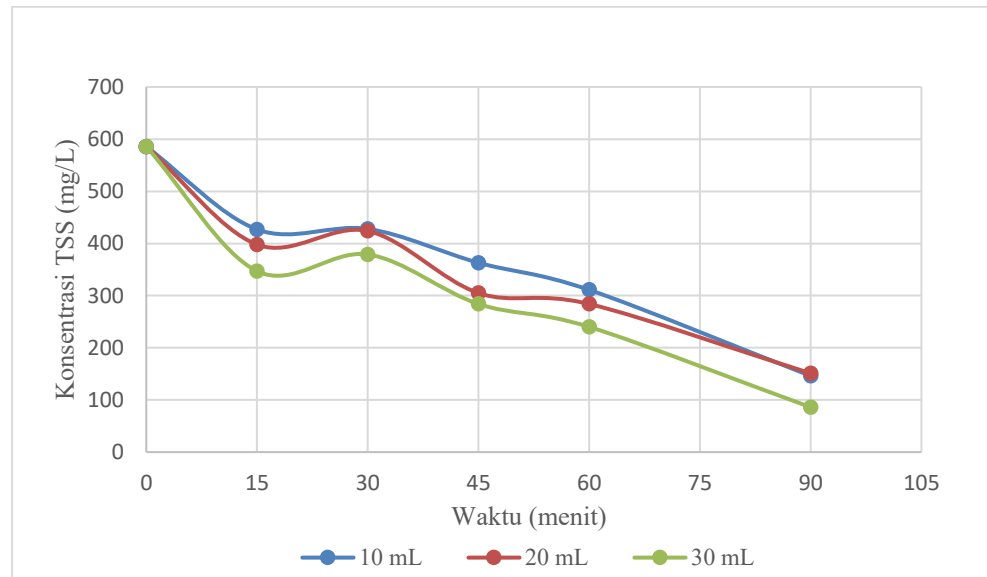
Nilai COD mengalami penurunan yang fluktuatif pada penelitian ini. Dari masing-masing dosis H_2O_2 , pada menit ke 15 mengalami penurunan yang cukup tinggi, lalu mengalami sedikit kenaikan pada menit ke 45 dan 60, dan mengalami penurunan kembali pada menit ke 90. Menurut (Rezagama, 2013), ada 2 tahap dari penurunan nilai COD, yaitu penurunan cepat dimana terjadi penurunan COD dengan kecepatan tinggi, dan tahap titik balik, dimana kecepatan reaksi menurun. Hal ini menjelaskan nilai COD yang mengalami penurunan secara pesat pada menit ke 15. Setelah titik balik tersebut, terjadi sedikit peningkatan nilai COD, hal ini kemungkinan disebabkan oleh pembentukan senyawa antara atau pembentukan radikal hidroksil yang menurun. Namun, dengan bertambahnya waktu ozonasi hingga menit ke-90 dan adanya penambahan H_2O_2 , nilai COD mengalami penurunan, hal ini terjadi karena semakin lama waktu maka semakin banyak ozon terlarut yang bereaksi dengan H_2O_2 yang dapat mengurai senyawa organik (Sekaringgalih et al., 2023).

Hidrogen peroksida (H_2O_2) dalam metode ini digunakan untuk menghilangkan polutan yang sulit terdegradasi. Dimana, dengan kombinasi antara $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ dapat memberikan penghilangan polutan organik yang lebih baik dibandingkan hanya dengan O_3 saja, hal ini dikarenakan H_2O_2 memiliki kemampuan dalam mempercepat dekomposisi ozon melalui mekanisme transfer elektron dan pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) (Qingyi Ma, 2024). Dosis 20 mL H_2O_2 menunjukkan penurunan COD yang paling kecil dibandingkan dengan dosis 10 mL dan 30 mL, hal ini mengindikasikan adanya inhibitor yang disebut dengan radikal hidroksil scavenger yang dapat membatasi atau menghambat kerja radikal bebas. Namun, dengan dosis 30 mL menunjukkan penurunan COD yang paling rendah, hal ini menunjukkan

meskipun terjadi reaksi scavenging, jumlah H_2O_2 yang cukup tinggi dapat meningkatkan kembali pembentukan radikal hidroksil (Rekhate et al., 2025).

4.3.2 Penurunan konsentrasi TSS dengan menggunakan metode perokson dengan variasi waktu ozonasi dan dosis H_2O_2

Berdasarkan hasil pengolahan dengan menggunakan AOPs metode perokson, rata-rata penurunan TSS terbesar terjadi pada kombinasi O_3/H_2O_2 dengan penambahan H_2O_2 30 mL di menit ke- 90, yaitu mencapai 86 mg/L atau mencapai 85%. Dan rata-rata penurunan TSS terkecil terjadi pada penambahan H_2O_2 10 mL di menit ke-15. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Kurva penurunan TSS menggunakan AOPs metode perokson variasi waktu ozonasi dan dosis H_2O_2

Konsentrasi TSS pada limbah cair laboratorium yang tinggi, mengalami pengurangan yang signifikan dengan pengolahan menggunakan AOPs metode perokson. Namun, penurunan konsentrasi dengan pengolahan beberapa variasi waktu ozonasi dan dosis H_2O_2 mengalami fluktuasi. Pada gambar 4.4 menunjukkan penurunan konsentrasi TSS pada menit ke-15, lalu pada menit ke-30 terjadi peningkatan konsentrasi TSS untuk setiap dosis H_2O_2 namun tidak melebihi konsentrasi awal, setelah menit ke-30 terjadi penurunan yang konsisten pada konsentrasi TSS untuk setiap dosis H_2O_2 .

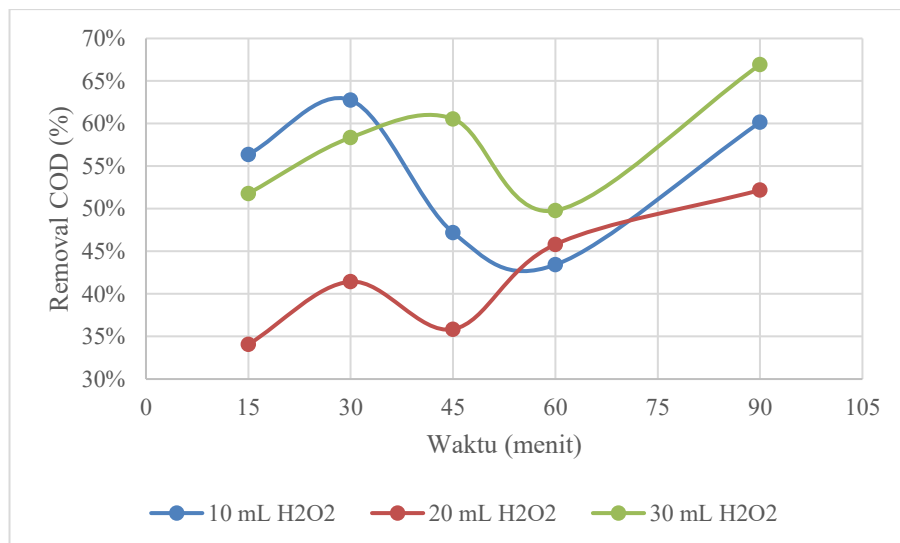
Sedikit fluktuasi pada menit ke-30 dapat disebabkan karena terganggunya kestabilan partikel tersuspensi akibat pembentukan senyawa antara atau dapat disebabkan karena belum maksimalnya reaksi oksidasi pada menit tersebut. Namun, setelah melalui menit ke-30, proses ozonasi terus berlangsung yang menyebabkan reaksi degradasi menjadi lebih stabil.

Berdasarkan gambar 4.4 dapat dilihat setelah menit ke-30 konsentrasi TSS semakin menurun seiring bertambahnya waktu ozonasi, hal ini disebabkan semakin lama waktu ozonasi dengan penambahan H_2O_2 , maka semakin banyak radikal hidroksil yang bereaksi dengan air limbah. Dengan penambahan 30 mL H_2O_2 , terjadi penurunan TSS yang paling besar, hal ini menandakan dalam proses ini terjadi pembentukan radikal hidroksil lebih banyak dibandingkan dengan dosis 10 dan 20 mL. Penurunan konsentrasi TSS pada pengolahan ini dikarenakan radikal hidroksil yang terbentuk dari kombinasi O_3/H_2O_2 bertumbukan secara langsung dengan zat organik dalam air limbah sehingga dapat mengoksidasi parameter pencemar. (Imtiyas et al., 2016).

4.3.3 Pengaruh AOPs metode perokson (O_3/H_2O_2) terhadap penurunan COD

Pengaruh AOPs metode perokson dengan memvariasikan waktu ozonasi dan dosis hidrogen peroksida yang dikenakan pada limbah cair laboratorium dilakukan untuk mengetahui waktu ozonasi dan dosis yang optimal dalam menurunkan konsentrasi pencemar COD. Metode perokson ini berpengaruh dalam menurunkan COD karena terbentuknya radikal hidroksil dari reaksi antara ozon dan hidrogen peroksida, dimana radikal ini bersifat sangat reaktif dan mampu menguraikan berbagai senyawa organik yang kompleks menjadi senyawa yang sederhana. Proses ini menunjukkan metode perokson dalam menurunkan konsentrasi COD dengan efisiensi yang bervariasi. Efisiensi pengolahan air limbah laboratorium menggunakan AOPs metode perokson terhadap penurunan konsentrasi COD dapat dilihat pada Gambar 4.5. Penyisihan COD terbesar yaitu pada waktu ozonasi selama 90

menit dengan dosis hidrogen peroksida sebesar 30 mL, yaitu mencapai 67%. Hal ini menunjukkan pada dosis hidrogen peroksida 30 mL dan waktu 90 menit membentuk lebih banyak radikal hidroksil. Besarnya penyisihan ini disebabkan karena reaksi radikal hidroksil dengan senyawa organik dalam limbah cair laboratorium, dimana senyawa organik dioksidasi oleh radikal hidroksil (Rahmayanti et al., 2022). Efisiensi penurunan COD pada setiap waktu ozonasi dan dosis hidrogen peroksida terjadi secara fluktuatif, hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Rezagama, 2013), yang menyatakan bahwa penurunan COD ada 2 tahap, yaitu penurunan cepat dan tahap titik balik. Maka, dalam penelitian ini diketahui bahwa AOPs metode perokson berpengaruh dalam menurunkan konsentrasi COD pada limbah cair laboratorium.

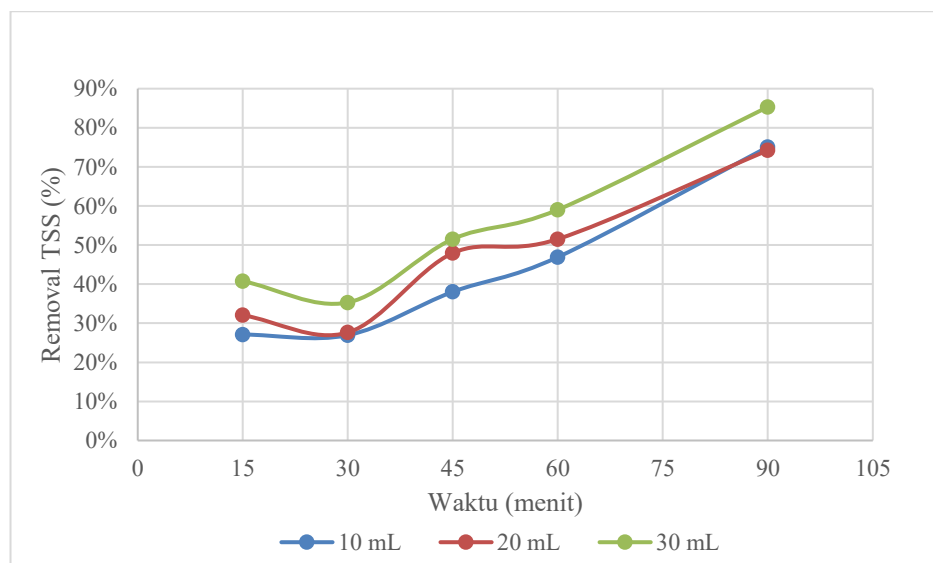


Gambar 4. 5 Persentase penurunan konsentrasi COD menggunakan AOPs metode perokson

4.3.4 Pengaruh AOPs metode perokson (O_3/H_2O_2) terhadap penurunan TSS

Pengaruh AOPs metode perokson dengan memvariasikan waktu ozonasi dan dosis hidrogen peroksida yang dikenakan pada limbah cair laboratorium dilakukan untuk mengetahui waktu ozonasi dan dosis yang optimal dalam menurunkan konsentrasi pencemar TSS. Berdasarkan Gambar 4.6 proses AOPs metode perokson memiliki pengaruh yang sangat signifikan

terhadap penurunan konsentrasi TSS. Efisiensi removal TSS meningkat seiring meningkatnya waktu ozonasi dan dosis hidrogen peroksida. Efisiensi tertinggi dicapai pada menit ke-90 dan dosis hidrogen peroksida sebesar 30 mL, yaitu mencapai 85%. Penurunan ini disebabkan oksidasi oleh radikal hidroksil yang terbentuk dari reaksi antara ozon dan hidrogen peroksida yang menyebabkan partikel padat tersuspensi terurai menjadi senyawa lebih kecil atau senyawa terlarut, sehingga partikel tersuspensi berkurang (Dianawati et al., 2017).



Gambar 4. 6 Persentase penurunan konsentrasi TSS menggunakan AOPs metode perokson

4.4 Pengaruh AOPs metode perokson terhadap kualitas air limbah laboratorium

Berdasarkan pengolahan yang telah dilakukan sesuai dengan variasi waktu ozonasi dan dosis hidrogen peroksida, diperoleh penurunan yang fluktuatif pada konsentrasi COD dan penurunan yang signifikan pada konsentrasi TSS. Dimana, kondisi optimum pengolahan didapat pada sampel yang disesuaikan pada pH 8, waktu ozonasi selama 90 menit dan dosis H₂O₂ sebesar 30 mL yang memperoleh efisiensi penurunan COD yaitu 67%, dan efisiensi penurunan TSS yaitu 85%. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan waktu ozonasi dan penambahan dosis H₂O₂ berpengaruh terhadap efisiensi proses. Namun, penambahan waktu ozonasi dan dosis H₂O₂ yang berlebihan

atau tidak tepat dapat mengurangi kinerja AOPs, hal ini karena adanya kemungkinan terjadi radikal scavenger (Imtiyas et al., 2016). Radikal hidroksil yang terbentuk dari reaksi antara O_3 dan H_2O_2 dapat menurunkan COD karena terjadinya oksidasi senyawa organik kompleks menjadi lebih sederhana, dan dapat menguraikan partikel organik besar menjadi senyawa larut atau partikel halus yang tidak terdeteksi dalam pengukuran padatan tersuspensi (TSS) (Bokare & Choi, 2014).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa AOPs metode perokson mampu menurunkan konsentrasi COD dan TSS pada air limbah. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Imtiyas et al., 2016) dan (Sekaringgalih et al., 2023) yang menunjukkan bahwa kombinasi O_3/H_2O_2 mampu menurunkan kandungan organik dalam air limbah. Namun, ada perbedaan hasil persentase penurunan parameter pencemar, hal ini dapat disebabkan karena sumber dan karakteristik air limbah yang berbeda, bedanya variasi waktu ozonasi dan dosis H_2O_2 yang digunakan. Dalam penelitian ini yang menggunakan air limbah laboratorium sebagai sampel, diketahui setelah pengolahan dengan AOPs metode perokson, untuk konsentrasi TSS telah memenuhi baku mutu yaitu < 200 mg/L. Sementara itu, konsentrasi COD masih belum memenuhi baku mutu, namun jika dilihat dari besarnya penurunan konsentrasi COD, metode ini menunjukkan efektivitas yang baik dalam menurunkan beban pencemar COD dalam air limbah laboratorium.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian penurunan konsentrasi COD dan TSS Pada Limbah Cair Laboratorium Dengan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Kombinasi Ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2), dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. AOPs metode perokson menunjukkan efisiensi penurunan COD tertinggi dari 8367 mg/l sebesar 67% setelah proses AOPs metode perokson, dan efisiensi penurunan TSS tertinggi dari 735 mg/l sebesar 85% pada waktu ozonasi (O_3) selama 90 menit dan dosis H_2O_2 30 mL setelah proses AOPs metode perokson.
2. Waktu ozonasi (O_3) yang optimal dalam menurunkan COD dan TSS pada penelitian ini yaitu pada menit ke-90, dan dosis hidrogen peroksida yang optimal dalam menurunkan TSS pada penelitian ini yaitu pada dosis 30 mL.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis memberikan beberapa saran yang dapat menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Dalam penelitian selanjutnya, perlu menambahkan variasi waktu ozonasi dan dosis hidrogen peroksida untuk mendapatkan kondisi optimum yang paling efisien.
2. Dalam penelitian selanjutnya, perlu pengujian dengan memvariasikan pH sampel untuk mengetahui pH yang baik dalam menurunkan COD dan TSS pada limbah cair laboratorium.
3. Dalam penelitian selanjutnya, dapat dilakukan percobaan dengan menambahkan H_2O_2 setelah sampel dikontakkan dengan ozon pada waktu tertentu

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S. (2024). *Efisiensi Removal Unit Pengolah Air Limbah* (N. Duniawati, Ed.). CV. Adanu Abimata.
- Ameta, R. (2018). *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*.
- Anggraini, N., Agustina, T. E., & Hadiah, F. (2022). Pengaruh pH dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, dan Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345–355. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355>
- Asriyati, D. (2006). *Penurunan Kadar Merkuri dan COD Pada Limbah Cair Laboratorium Universitas Islam Indonesia Menggunakan Reaktor Elektrolisis Dengan Elektroda Stainless*.
- Audiana, M., Apriani, I., & Kadaria, U. (2017). *Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Teknik Lingkungan Dengan Koagulasi Dan Adsorpsi Untuk Menurunkan COD, Fe, Dan Pb*.
- Azamia, M. (2012). *Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Kimia Dalam Penurunan Kadar Organik Serta Logam Berat Fe, Mn, Cr Dengan Metode Koagulasi Dan Adsorpsi*.
- Bokare, A. D., & Choi, W. (2014). Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.054>
- Cahyana, G. H., & Permadi, D. (2018). *Pengolahan Air Limbah Laboratorium Menggunaka Metode AOPs (Advanced Oxidation Processes) Dengan Pereaksi Fenton (H₂O₂ dan FeSO₄) Pada Skala Batch* (Vol. 1, Issue 1).
- Dianawati, R. I., Endah Wahyuningsih, N., Nur, M., Kesehatan Lingkungan, B., & Kesehatan Masyarakat, F. (2017). *Efektivitas Ozon Dalam Menurunkan Kadar TSS Dan Nilai pH Limbah Cair Rumah Sakit Dr. Adhyatma, Mph Semarang* (Vol. 5). <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm>

- Djo, Y. H. W., Suastuti, D. A., Suprihatin, I. E., & Sulihingtyas, W. D. (2017). Fitoremediasi Limbah Cair UPT Laboratorium Analitik Universitas Udayana Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) Ditinjau dari Penurunan Nilai COD dan Kandungan Logam Berat Cu dan Cr 1*. *Jurnal Media Sains*, 1(2), 63–70.
- Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science & Engineering*, 9(4), 335–352. <https://doi.org/10.1080/01919518708552148>
- Hamdaoui, U. (2024). *Innovative and Hybrid Advanced Oxidation Processes for Water Treatment* (L. Lawrance, Ed.). Joseph Hayton.
- Harahap, M. R., Amanda, L. D., & Matondang, A. H. (2020). Analisis Kadar COD (Chemical Oxygen Demand) dan TSS (Total Suspended Solid) Pada Limbah Cair dengan Menggunakan Spektrofotometer UV-VIS. *AMINA*, Vol. 2, No. 2.
- Hassan, A. K., Abdul, H. M. M., & Hasan, A. F. (2020). Treatment of Iraqi Petroleum Refinery Wastewater by Advanced Oxidation Processes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1660(1), 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1660/1/012071>
- Imtiyas, I., Rezagama, A., & Luvita, V. (2016). Pengolahan BOD, COD, TSS, dan pH Pada Limbah Industri MSG (Monosodium Glutamate) Menggunakan Teknologi Advanced Oxidation Processes (O₃/H₂O₂ dan Fenton). *Jurusan Teknik Lingkungan*.
- Kurniawan, T. A., Lo, W. hung, & Chan, G. Y. S. (2006). Radicals-catalyzed oxidation reactions for degradation of recalcitrant compounds from landfill leachate. *Chemical Engineering Journal*, 125(1), 35–57. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.07.006>
- Lumaela, A. K., Otok, B. W., & Sutikno. (2013). Pemodelan Chemical Oxygen Demand (COD) Sungai di Surabaya Dengan Metode Mixed Geographically Weighted Regression. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, Vol. 2, No. 1.

- Lupu, G. I., Orbeci, C., Bobirică, L., Bobirică, C., & Pascu, L. F. (2023). Key Principles of Advanced Oxidation Processes: A Systematic Analysis of Current and Future Perspectives of the Removal of Antibiotics from Wastewater. In *Catalysts* (Vol. 13, Issue 9, p. 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/catal13091280>
- Majid, S. Y. J., & Sugito, S. (2022). PENURUNAN KADAR COD DAN LOGAM MERKURI (HG) LIMBAH CAIR LABORATORIUM DENGAN ELEKTROKOAGULASI. *WAKTU: Jurnal Teknik UNIPA*, 20(02), 88–93. <https://doi.org/10.36456/waktu.v20i02.5893>
- Maulin P, S. (2021). *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants* (Marinakos KI Koskas, Ed.). Susan Dennis.
- Muhammad Nur dkk. (2023). *TEKNOLOGI GELEMBUNG NANO-MIKRO OZON DALAM PENGOLAHAN AIR LIMBAH BATIK*. Penerbit Adab.
- Mulyani, W. (2006). *Penurunan Konsentrasi Amonia dan COD Pada Limbah Cair Laboratorium Universitas Islam Indonesia Menggunakan Reaktor Aerokarbonfilter*.
- Munouwarah, L., Hakim, L., Ishak, I., Jalaluddin, J., & Ginting, Z. (2023). Kajian Proses Ozonasi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Terhadap Penurunan Kadar Total Suspended Solid. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 3(3), 302. <https://doi.org/10.29103/cejs.v3i3.9281>
- Nabila, M. L., & Yuniarto, A. (2024). *Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Processes (AOPs) PPada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia*.
- Putri, I. N. (2016). *Penurunan Parameter COD dan Warna Pda Limbah Batik Dengan Menggunakan Ozon*. Universitas Islam Indonesia.
- Qingyi Ma. (2024). Application Of Advanced Oxidation Process Based on Ozone in Water Treatment. In *Highlights in Science, Engineering and Technology MSMEE* (Vol. 2024).

- Rachmawati, D. W., Khulaiiyah, Musni, Serdianus, Bahri, Indrawati, & Ningsi, K. L. (2022). *Metodologi Penelitian* (A. Purnamasari, Ed.; 1st ed.). Cendekia Publisher.
- Rahmayanti, A., Faradila, R. S., Masrufah, A., Puput, D., Permata, A., Lindi, S. 2022 P., Anggraini, P., & Sari, P. (2022). Pengolahan Lindi Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOPs) Berbasis Ozon. *Journal of Research and Technology*, 8(1), 141–148.
- Rekhate, C. V., Sen, S., Pal, D., & Prajapati, A. (2025). COD and color removal from real textile dyeing effluent using intensification of ozonation and Fenton ($O_3/Fe^{2+}/H_2O_2$) processes: optimization using RSM. *Discover Electrochemistry*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44373-025-00017-x>
- Rezagama, A. (2013). Studi Ozonisasi Senyawa Organik Air Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sarimukti. *Teknik*, 34(2), 82. <https://doi.org/10.14710/teknik.v34i2.5630>
- Riniptosari, L. (2006). *Penurunan Kadar Cromium dan COD Pada Limbah Cair laboratorium Universitas Islam Indonesia Menggunakan Reaktor Elektrolisis Dengan Elektroda Aluminium*.
- Ristiawan, A., & Syafila, D. M. (2015). Kinetika Degradasi Lignin Dari Limbah Cair Industri Pulp And Paper Menggunakan Advanced Oxidation Process (Aop) Dengan Kombinasi Ozon Dan Hidrogen Peroksida Degradation Kinetic Of Lignin From Pulp And Paper Mill Wastewater Using Advanced Oxidation Process (Aop) With Ozone And Hydrogen Peroxide In Combination. In *Jurnal Teknik Lingkungan* (Vol. 21).
- Sari, Y. S. (2019). Mengolah COD Pada Limbah Laboratorium. *Jurnal Komunitas : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat, Vol. 1, No. 2*.
- Sekaringgalih, R., Nur, A., & Rachmah, L. (2023). Treatment Of The Gelatin Wastewater With Ozone Peroxide Advanced Oxidation Process. In *Jurnal Teknik Sipil* (Vol. 18, Issue 2).

- Selamat, M. (2007). *Penurunan Konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS) dan Timbal (Pb) Pada Limbah Laboratorium Kimia Teradu Universitas Islam Indonesia Menggunakan Karbon Arang Aktif*. Universitas Islam Indonesia.
- Syafira, I. (2021). *Efektivitas Alat Pengolah Limbah Berdasarkan Kandungan Total Suspended Solids (TSS), Chemical Oxygen Demand (COD), Logam Cu, Fe Dan Pb Di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia*.
- Torrejón, J. A. A., Balderas-Hernández, P., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C. E., Rodríguez-Torres, I., & Torres-Blancas, T. (2023). Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and TOC in water—An overview through time. In *SN Applied Sciences* (Vol. 5, Issue 4). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05318-7>
- Wijayanti, M. S., Agustina, T. E., Dahlan, M. H., & Teguh, D. (2024). Pengolahan Air Limbah Laboratorium Menggunakan AOPs Secara Terintegrasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 142–149. <https://doi.org/10.14710/jil.22.1.142-149>

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan

1. Perhitungan kadar ozon

- Volume larutan KI (V) = 100 mL
- Normalitas Na₂S₂O₃ (N) = 0,092 N
- Mr O₃ (B) = 48
- Volume titrasi Na₂S₂O₃ (A):
 - 15 menit = 5,7 mL
 - 30 menit = 14,6 mL
 - 45 menit = 16,3 mL
 - 60 menit = 2,1 mL
 - 90 menit = 1,8 mL

- Persamaan :

$$\text{Kadar ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{1}{2} \times A \times N \times B}{V}$$

- Kadar ozon pada 15 menit

$$\text{Kadar ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{1}{2} \times 5,7 \times 0,092 \times 48}{0,1} = 125,2$$

- Kadar ozon pada 30 menit

$$\text{Kadar ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{1}{2} \times 14,5 \times 0,092 \times 48}{0,1} = 320,7$$

- Kadar ozon pada 45 menit

$$\text{Kadar ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{1}{2} \times 16,3 \times 0,092 \times 48}{0,1} = 358,1$$

- Kadar ozon pada 60 menit

$$\text{Kadar ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{1}{2} \times 2,1 \times 0,092 \times 48}{0,1} = 46,1$$

- Kadar ozon pada 90 menit

$$\text{Kadar ozon } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{1}{2} \times 1,8 \times 0,092 \times 48}{0,1} = 39,5$$

2. Data konsentrasi TSS Awal

- Volume sampel = 100 mL
- Faktor pengencer = 2

Keterangan	Kertas saring awal (g)	kertas saring+residu (g)	TSS (g/L)	TSS (mg/L)	TSS x faktor pengencer (mg/L)
Pengujian Pertama	1,0372	1,0585	0,213	213	426
	1,0299	1,0536	0,237	237	474

Keterangan	Kertas saring awal (g)	kertas saring+residu (g)	TSS (g/L)	TSS (mg/L)	TSS x faktor pengencer (mg/L)
	1,0298	1,0503	0,205	205	410
Konsentrasi TSS (mg/L)				218	437
Pengujian Kedua	1,2371	1,2743	0,372	372	744
	1,0336	1,0699	0,363	363	726
Konsentrasi TSS (mg/L)				368	735
Rata-rata konsentrasi TSS (mg/L)					586

3. Data konsentrasi COD Awal

- Pengujian pertama
 - Blanko = 0,027
 - Absorbansi = 0,319
 - Absorbansi koreksi = 0,292
- Pengujian kedua
 - Blanko = 0,030
 - Absorbansi = 0,319
 - Absorbansi koreksi = 0,289

- Persamaan

$$\text{Konsentrasi COD} = \frac{\text{Absorbansi} - 0,0395}{0,0003}$$

$$\text{Konsentrasi COD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = C \times f$$

Keterangan :

f = faktor pengenceran air limbah

- Konsentrasi COD pengujian pertama

$$\text{Konsentrasi COD} = \frac{0,292 - 0,0395}{0,0003} = 842$$

$$\text{Konsentrasi COD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 842 \times 2 \times 5 = 8417 \text{ mg/L}$$

- Konsentrasi COD pengujian kedua

$$\text{Konsentrasi COD} = \frac{0,289 - 0,0395}{0,0003} = 832$$

$$\text{Konsentrasi COD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 832 \times 2 \times 5 = 8317 \text{ mg/L}$$

- Konsentrasi rata-rata COD awal

$$\text{Konsentrasi rata-rata} = \frac{8417+8317}{2} = 8367 \text{ mg/L}$$

4. Pengenceran sampel limbah

- Konsentrasi COD awal = 8367 mg/L
- Konsentrasi target = 4183 mg/L
- Persamaan :

$$\text{Rumus pengenceran (V}_1\text{)} = \frac{C_2 \times V_2}{C_1}$$

Keterangan :

C_1 = konsentrasi COD awal

C_2 = konsentrasi COD target

V_1 = volume sampel yang akan diambil

V_2 = volume sampel akhir

- Pengenceran untuk volume total kebutuhan AOPs

$$\text{Rumus pengenceran (V}_1\text{)} = \frac{4183 \times 16000}{8367} = 8000 \text{ mL}$$

- Pengenceran untuk volume total 1 variasi dosis H₂O₂

$$\text{Rumus pengenceran (V}_1\text{)} = \frac{4183 \times 5000}{8367} = 2500 \text{ mL}$$

Lampiran 2 Analisis Data

1. Data hasil uji COD dengan AOPs metode perokson

- Pengenceran sampel limbah = 2 kali
- Pengenceran untuk uji COD = 5 kali
- Total pengenceran = 10 kali

1.1 Pengujian AOPs metode perokson pertama

Variasi	Dosis H ₂ O ₂	Absorbansi	Absorbansi koreksi	Konsentrasi COD (mg/L)	Konsentrasi x pengenceran (mg/L)	Persen removal (%)
Blank		0.027		-42		
Awal		0.319	0.292	842	8417	
15 menit	10 mL	0.170	0.143	345	3450	59%
30 menit		0.158	0.131	305	3050	64%
45 menit		0.199	0.172	442	4417	48%
60 menit		0.192	0.165	418	4183	50%
90 menit		0.172	0.145	352	3517	58%
Awal		0.319	0.292	842	8417	
15 menit	20 mL	0.223	0.196	522	5217	38%
30 menit		0.202	0.175	452	4517	46%
45 menit		0.238	0.211	572	5717	32%
60 menit		0.195	0.168	428	4283	49%
90 menit		0.190	0.163	412	4117	51%
Awal		0.319	0.292	842	8417	
15 menit	30 mL	0.187	0.160	402	4017	52%
30 menit		0.178	0.151	372	3717	56%
45 menit		0.164	0.137	325	3250	61%
60 menit		0.187	0.160	402	4017	52%
90 menit		0.148	0.121	272	2717	68%
Persen paling besar						68%

1.2 Pengujian AOPs metode perokson kedua

Variasi	Dosis H ₂ O ₂	Absorbansi	Absorbansi koreksi	Konsentrasi COD	Konsentrasi x pengenceran	Persen removal (%)
Blank		0.030		-32		
Awal		0.319	0.289	832	8317	

Variasi	Dosis H ₂ O ₂	Absorbansi	Absorbansi koreksi	Konsentrasi COD	Konsentrasi x pengenceran	Persen removal (%)
15 menit	10 mL	0.185	0.155	385	3850	54%
30 menit		0.165	0.135	318	3183	62%
45 menit		0.202	0.172	442	4417	47%
60 menit		0.228	0.198	528	5283	36%
90 menit		0.164	0.134	315	3150	62%
Awal		0.319	0.289	832	8317	
15 menit	20 mL	0.244	0.214	582	5817	30%
30 menit		0.228	0.198	528	5283	36%
45 menit		0.220	0.190	502	5017	40%
60 menit		0.213	0.183	478	4783	42%
90 menit		0.186	0.156	388	3883	53%
Awal		0.319	0.289	832	8317	
15 menit	30 mL	0.191	0.161	405	4050	51%
30 menit		0.167	0.137	325	3250	61%
45 menit		0.170	0.140	335	3350	60%
60 menit		0.201	0.171	438	4383	47%
90 menit		0.154	0.124	282	2817	66%
Persen paling besar						66%

1.3 Konsentrasi COD rata-rata dari 2 kali pengujian

Variasi	Dosis H ₂ O ₂	Konsentrasi COD pengujian 1	Konsentrasi COD pengujian 2	Konsentrasi COD	Persen removal (%)
Awal		8417	8317	8367	
15 menit	10 mL	3450	3850	3650	56%
30 menit		3050	3183	3117	63%
45 menit		4417	4417	4417	47%
60 menit		4183	5283	4733	43%
90 menit		3517	3150	3333	60%
Awal		8417	8317	8367	
15 menit	20 mL	5217	5817	5517	34%
30 menit		4517	5283	4900	41%
45 menit		5717	5017	5367	36%
60 menit		4283	4783	4533	46%
90 menit		4117	3883	4000	52%
Awal		8417	8317	8367	

Variasi	Dosis H ₂ O ₂	Konsentrasi COD pengujian 1	Konsentrasi COD pengujian 2	Konsentrasi COD	Persen removal (%)
15 menit	30 mL	4017	4050	4033	52%
30 menit		3717	3250	3483	58%
45 menit		3250	3350	3300	61%
60 menit		4017	4383	4200	50%
90 menit		2717	2817	2767	67%
Persen paling besar					67%

2. Data hasil uji TSS dengan AOPs metode perokson

2.1 Pengujian AOPs metode perokson pertama

Waktu (menit)	Dosis H ₂ O ₂ (mL)	Kertas saring kosong (g)	Kertas saring kosong (mg)	Kertas saring + residu (g)	Kertas saring + residu (mg)	TSS (mg/L)	TSS x f (mg/L)	Persen removal (%)
0						218	437	
15	10	1.0176	1017.6	1.0347	1034.7	171	342	22%
30		1.0333	1033.3	1.0523	1052.3	190	380	13%
45		1.0108	1010.8	1.0263	1026.3	155	310	29%
60		1.0399	1039.9	1.0544	1054.4	145	290	34%
90		1.0268	1026.8	1.0309	1030.9	41	82	81%
0						218	437	
15	20	1.0248	1024.8	1.0418	1041.8	170	340	22%
30		1.0204	1020.4	1.0388	1038.8	184	368	16%
45		1.0518	1051.8	1.0646	1064.6	128	256	41%
60		1.0161	1016.1	1.0287	1028.7	126	252	42%
90		1.0398	1039.8	1.0438	1043.8	40	80	82%
0						218	437	
15	30	1.0152	1015.2	1.0321	1032.1	169	338	23%
30		1.0486	1048.6	1.0664	1066.4	178	356	18%
45		1.0346	1034.6	1.047	1047	124	248	43%
60		1.0224	1022.4	1.0327	1032.7	103	206	53%
90		1.0067	1006.7	1.0093	1009.3	26	52	88%
Persentase terbesar								88%

2.2 Pengujian AOPs metode perokson pertama

Waktu (menit)	Dosis H ₂ O ₂ (mL)	Kertas saring kosong (g)	Kertas saring kosong (mg)	Kertas saring + residu (g)	Kertas saring + residu (mg)	TSS (mg/L)	TSS x f (mg/L)	Persen removal (%)
0						368	735	
15	10	1.0405	1040.5	1.0661	1066.1	256	512	30%
30		1.0256	1025.6	1.0494	1049.4	238	476	35%
45		1.0181	1018.1	1.0389	1038.9	208	416	43%
60		1.0232	1023.2	1.0398	1039.8	166	332	55%
90		1.0402	1040.2	1.0507	1050.7	105	210	71%
0						368	735	
15	20	1.2289	1228.9	1.2517	1251.7	228	456	38%
30		1.2205	1220.5	1.2445	1244.5	240	480	35%
45		1.2211	1221.1	1.2388	1238.8	177	354	52%
60		1.215	1215	1.2308	1230.8	158	316	57%
90		1.2382	1238.2	1.2493	1249.3	111	222	70%
0						368	735	
15	30	1.2241	1224.1	1.2419	1241.9	178	356	52%
30		1.2278	1227.8	1.2479	1247.9	201	402	45%
45		1.202	1202	1.218	1218	160	320	56%
60		1.227	1227	1.2407	1240.7	137	274	63%
90		1.2389	1238.9	1.2449	1244.9	60	120	84%
Persentase terbesar								84%

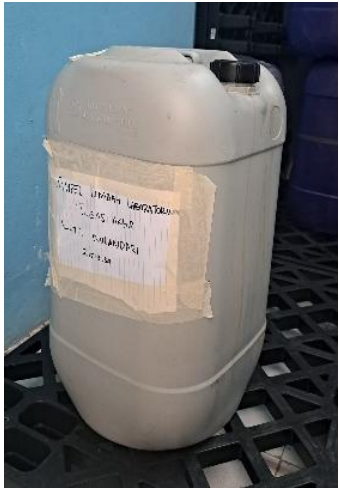
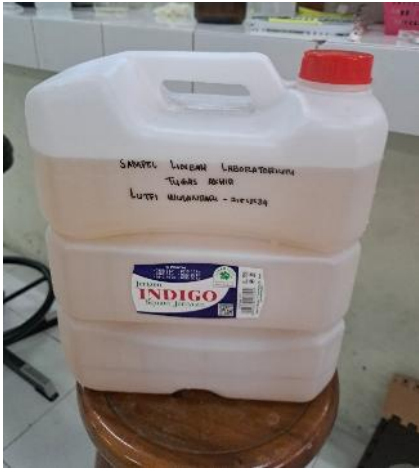
2.3 Konsentrasi TSS rata-rata dari 2 kali pengujian

Waktu (menit)	Dosis H ₂ O ₂	Konsentrasi TSS (mg/L) pengujian 1	Konsentrasi TSS (mg/L) pengujian 2	Konsentrasi TSS (mg/L)	persen removal (%)
0		437	735	586	
15	10 mL	342	512	427	27%
30		380	476	428	27%
45		310	416	363	38%
60		290	332	311	47%
90		82	210	146	75%
0		437	735	586	
15	20 mL	340	456	398	32%
30		368	480	424	28%



Waktu (menit)	Dosis H₂O₂	Konsentrasi TSS (mg/L) pengujian 1	Konsentrasi TSS (mg/L) pengujian 2	Konsentrasi TSS (mg/L)	persen removal (%)
45		256	354	305	48%
60		252	316	284	52%
90		80	222	151	74%
0		437	735	586	
15	30 mL	338	356	347	41%
30		356	402	379	35%
45		248	320	284	52%
60		206	274	240	59%
90		52	120	86	85%
Persen paling besar					85%

Lampiran 3 Dokumentasi Penelitian



1. Persiapan wadah sampel limbah laboratorium

	
Wadah sampel laboratorium 30 L	Wadah sampel yang diencerkan (10L)

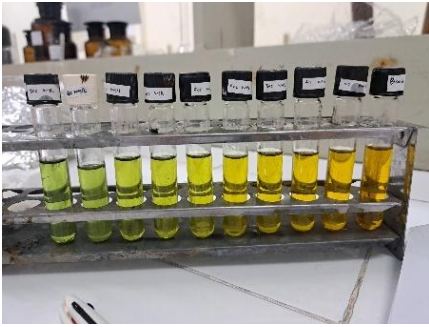


2. Persiapan bahan pengujian COD

	
Proses pembuatan digestion solution	Proses pembuatan larutan pereaksi asam sulfat

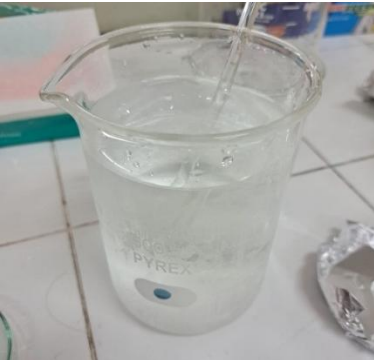

3. Persiapan ozon generator

	
<p>Persiapan ozon generator dalam uji kadar ozon</p>	<p>Persiapan ozon generator dalam pengolahan sampel limbah</p>

4. Pembuatan kurva kalibrasi

		
<p>Proses digestion larutan kerja</p>	<p>Proses refluks larutan kerja</p>	<p>Pembacaan absorbasi dengan spektrofotometer</p>

5. Pembuatan larutan penjerap (Kalium Iodida)

	
<p>Pembuatan larutan penjerap (Kalium Iodida) sebanyak 1000 mL</p>	

6. Perhitungan dosis ozon

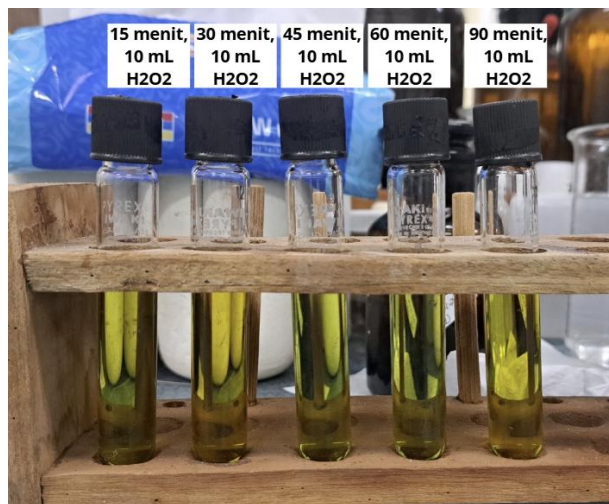
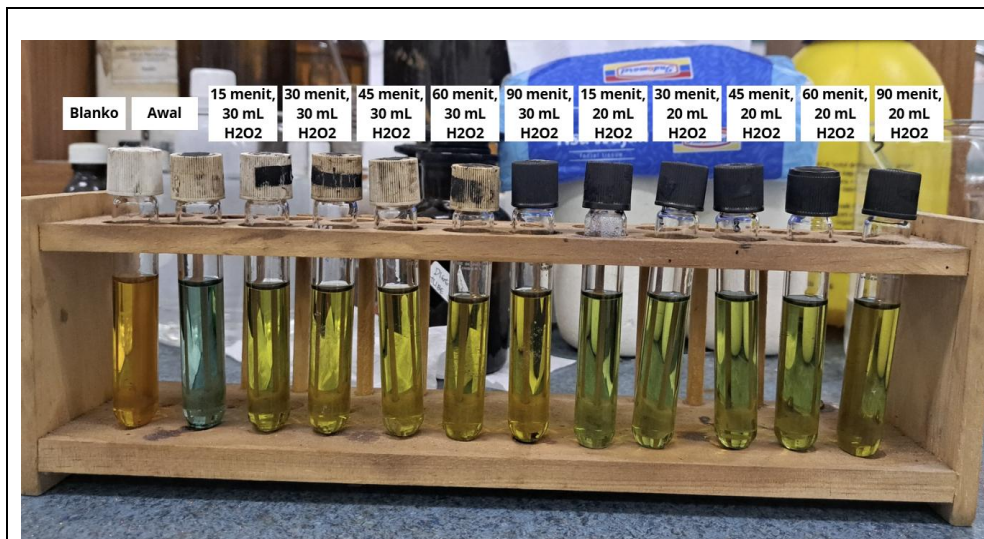


Proses perhitungan dosis ozon dengan titrasi iodometri

7. Pengujian COD setelah AOPs metode Perokson



Pengujian COD sampel dengan perokson (pengujian pertama)



Pengujian COD sampel setelah proses perokson (pengujian kedua)

8. Pengujian TSS setelah AOPs metode Perokson





Pengujian TSS sampel setelah proses perokson

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Lutfi Wulandari lahir di Lamandau pada tanggal 20 Oktober 2002 dan merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Sulaiman dan Ibu Kamsiyah. Penulis menempuh pendidikan menengah pertama di SMPN 4 Bulik pada tahun 2015 hingga 2018, kemudian menempuh pendidikan menengah atas di SMAN 1 Bulik pada tahun 2018 hingga 2021. Penulis melanjutkan pendidikan jenjang Strata satu (S1) di Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan.