

TUGAS AKHIR - RE184804

EFEKTIVITAS *ADVANCED OXIDATION PROCESSES* (AOPs) MENGGUNAKAN SISTEM O₃/UV UNTUK DEGRADASI SERAT MIKROPLASTIK DALAM AIR

IFTINAN NAJMA SADIDA

NRP. 03211840000014

Dosen Pembimbing

Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D

NIP.1980201712041

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2022



TUGAS AKHIR - RE184804

**EFEKTIVITAS *ADVANCED OXIDATION PROCESSES* (AOPs)
MENGUNAKAN SISTEM O₃/UV UNTUK DEGRADASI SERAT
MIKROPLASTIK DALAM AIR**

**IFTINAN NAJMA SADIDA
NRP. 0321184000014**

Dosen Pembimbing
Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D
NIP.1980201712041

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



FINAL PROJECT - RE184804

**THE EFFECTIVITY OF ADVANCED OXIDATION PROCESSES
(AOPs) USING O₃/UV SYSTEM FOR THE DEGRADATION OF
FIBROUS MICROPLASTICS IN WATER**

IFTINAN NAJMA SADIDA

NRP.0321184000014

Advisor

Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D

NIP.1980201712041

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

EFEKTIVITAS *ADVANCED OXIDATION PROCESSES* (AOPs) MENGGUNAKAN SISTEM O₃/UV UNTUK DEGRADASI SERAT MIKROPLASTIK DALAM AIR

TUGAS AKHIR

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

Oleh : IFTINAN NAJMA SADIDA

NRP. 0321184000014

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D

 Pembimbing

2. Dr. Ir. Agus Slamet, Msc

 Penguji

3. Dr. Ali Masduqi, ST., MT

 Penguji

4. Ainul Firdatun Nisaa, ST., Msc

 Penguji



Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Iftinan Najma Sadida / 03211840000014

Departemen : Teknik Lingkungan

Dosen Pembimbing / NIP : Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D / 1980201712041

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Efektivitas *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Menggunakan Sistem O₃/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D)
NIP.1980201712041

Mahasiswa



(Iftinan Najma Sadida)
NRP. 03211840000014

Halaman ini sengaja dikosongkan

EFEKTIVITAS *ADVANCED OXIDATION PROCESSES* (AOPs) MENGGUNAKAN SISTEM O₃/UV UNTUK DEGRADASI SERAT MIKROPLASTIK DALAM AIR

Nama Mahasiswa / NRP : Iftinan Najma Sadida / 0321184000014

Departemen : Teknik Lingkungan FTSPK - ITS

Dosen Pembimbing : Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D

Abstrak

Keberadaan mikroplastik di perairan sedang menjadi permasalahan yang diperhatikan oleh dunia. Keberadaannya juga telah terdeteksi di Sungai Surabaya yang digunakan sebagai air baku untuk air minum masyarakat Kota Surabaya. Mikroplastik umumnya masuk ke tubuh manusia melalui konsumsi makanan/minuman yang telah terkontaminasi dan jika terakumulasi dalam tubuh manusia dapat menyebabkan gangguan fisiologis hingga potensi kanker. Oleh karena itu dibutuhkan teknologi yang dapat mendegradasi mikroplastik menjadi senyawa yang tidak berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan. Teknologi yang berpotensi untuk mengolah mikropolutan adalah *advanced oxidation processes* (AOPs) dengan sistem O₃/UV. Penelitian ini menerapkan AOP berbasis O₃/UV untuk mendegradasi mikroplastik khususnya yang berbentuk serat dalam air untuk mengetahui efektivitas dan kondisi optimum pengolahannya.

Eksperimen dilakukan terhadap sampel air buatan dari serat benang *polyester* (PET) dan *nylon* (PA) yang didispersikan ke dalam air suling dengan konsentrasi 0,1 dan 0,5 mg/L. Dosis ozon diberikan sebesar 2 L/menit secara konstan dan intensitas iradiasi UV divariasikan menjadi tiga yaitu 30, 169, dan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Eksperimen dilakukan selama 360 menit dengan pengambilan sampel setiap 120 menit. Parameter yang diuji meliputi COD, analisis visual yaitu pengamatan mikroskop dan SEM, serta FTIR dan GC-MS. Selain itu juga dilakukan analisis statistik untuk mengetahui pengaruh setiap variabel terhadap besar degradasi yang terjadi.

Degradasi serat mikroplastik ditandai dengan peningkatan COD dalam air serta perubahan morfologi dan kimia permukaannya. Hasil menunjukkan adanya peningkatan COD setelah melalui pengolahan AOP. Peningkatan paling besar terjadi pada variasi 0,1 mg/L PA dengan intensitas iradiasi UV sebesar 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ selama 240 menit yaitu meningkat 12,87 kali lipat. Analisis mikroskop menunjukkan terdapat serat yang menipis dan lebih kecil setelah 360 menit waktu iradiasi. Analisis SEM memberikan gambaran lebih jelas perubahan morfologi permukaan serat mikroplastik yaitu adanya retakan dan kerutan yang terbentuk. Perubahan *carbonyl index* (CI) juga dapat menunjukkan terjadinya oksidasi permukaan. Serat mikroplastik jenis PET mengalami penurunan dari 6,67 menjadi 5,52 dan jenis PA mengalami peningkatan dari 1,37 menjadi 2,41. Semakin besar dan lama paparan intensitas iradiasi UV, semakin besar pula degradasi yang terjadi. Analisis statistik juga memberikan hasil bahwa faktor waktu dan intensitas iradiasi UV berpengaruh secara signifikan terhadap degradasi serat mikroplastik. Walaupun demikian, AOP yang diterapkan belum dapat mendegradasi dan memineralisasi total serat mikroplastik melihat banyak mikroplastik yang bentuk dan

ukurannya serupa dengan kondisi semula. Kondisi yang menunjukkan degradasi paling besar dalam penelitian ini adalah intensitas iradiasi paling tinggi dengan waktu kontak maksimum yaitu $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ selama 360 menit.

Kata kunci: AOPs, degradasi, ozon, pengolahan mikroplastik, serat mikroplastik, UV

THE EFFECTIVITY OF ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOPs) USING O₃- /UV SYSTEM FOR THE DEGRADATION OF FIBROUS MICROPLASTICS IN WATER

Student Name / NRP : Iftinan Najma Sadida / 0321184000014

Departement : Environmental Engineering CIVPLAN - ITS

Advisor : Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D

Abstract

The presence of microplastics in water has become an ongoing concern around the world. Its abundance has also been detected in the Surabaya River, which is used as raw water for drinking water. The main entry pathway of microplastics into the human body is through the consumption of contaminated food/drinks and it can cause several physiological disorders, from oxidative stress to the potential for cancer if accumulated in the human body. Therefore, a technology that can degrade microplastics into substances that are safe for the environment and human health is needed. The potential technology to treat micropollutants is advanced oxidation processes (AOPs) using O₃/UV system. This research applied O₃/UV-based AOP to degrade microplastics, especially fibrous ones in water, to determine the effectiveness and optimum treatment conditions.

Experiments were carried out on artificial water samples made of polyester (PET) and nylon (PA) yarn dispersed in distilled water with concentrations of 0.1 and 0.5 mg/L. The ozone dose was constant at 2 L/min and the intensity of UV irradiation was varied into three levels: 30, 169, and 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. The experiment was carried out for 360 minutes with samples taken every 120 minutes. Parameters tested included COD, visual analysis, namely microscope observation and SEM, as well as FTIR and GC-MS. In addition, statistical analysis was also carried out to determine the effect of each variable on the degree of the degradation that occurred.

Fibrous microplastics degradation is characterized by an increase in COD in water and changes in morphology and surface chemistry. The results showed an increase in COD after going through AOP treatment. The greatest increase occurred in the variation of 0.1 mg/L PA with UV irradiation intensity of 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ for 240 minutes, which increased 12.87 times. Microscopic analysis showed that there were thinner and smaller fibers after 360 minutes of irradiation time. SEM analysis provides a clearer picture of changes in the surface morphology of fibrous microplastics, namely the presence of cracks and wrinkles that are formed. Changes in carbonyl index (CI) can also indicate the occurrence of surface oxidation. PET fiber's CI value decreased from 6.67 to 5.52 and PA type increased from 1.37 to 2.41. The greater and longer the exposure to UV irradiation intensity, the greater the degradation that occurs. Statistical analysis also showed that the time factor and UV irradiation intensity had a significant effect on the degradation of fibrous microplastics. However, the applied AOP has not been able to completely degrade and mineralize fibrous microplastics, seeing that many microplastics are similar in shape and size to their initial condition. The condition that

showed the greatest degradation in this study was the highest irradiation intensity with a maximum contact time of 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ for 360 minutes.

Key words: AOPs, degradation, fibrous microplastic, microplastic treatment, ozone, UV

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas berkat, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Efektivitas *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Menggunakan Sistem O₃/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air” dengan baik dan tepat waktu. Dalam penulisan laporan tugas akhir ini, penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Ibu Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir sekaligus dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingannya pada saat pengerjaan tugas akhir dan pembelajaran kuliah.
2. Bapak Dr. Ir. Agus Slamet, M.Sc, Bapak Dr. Ali Masduqi, ST. MT, dan Ibu Ainul Firdatun Nisaa, ST., Msc selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan masukan selama pengerjaan tugas akhir.
3. Ibu Harmin Sulistiyaning Titah, ST, MT, Ph.D. selaku koordinator tugas akhir yang telah membantu perijinan pelaksanaan tugas akhir.
4. Bapak M. Ashari selaku laboran Laboratorium Pengolahan Air yang telah membimbing dan membantu dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir.
5. Teman-teman satu pembimbing tugas akhir yaitu Khansa, Reinata, dan Fernando, serta teman-teman satu angkatan terutama Shalmia, Elfira, Natasya, Adhiola, Mahardhika, Vania, Carissa, Alifa, Faz, Fajrul, dan Halif yang selalu memberi dukungan dan telah berjuang bersama dalam menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
6. Kedua orang tua, kakak, dan adik penulis yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan baik secara moral maupun materiil kepada penulis.
7. Semua pihak yang membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam pelaksanaan tugas akhir walaupun tidak dapat disebut satu per satu.

Penulisan laporan tugas akhir ini telah dilakukan sebaik mungkin, namun tidak menutup kemungkinan adanya kekurangan yang tidak penulis sadari. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca maupun penulis.

Surabaya, Juli 2022

Iftinan Najma Sadida

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I: PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Ruang Lingkup	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II: TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Definisi Mikroplastik dan Fenomenanya	5
2.2 Efek Mikroplastik terhadap Lingkungan dan Kesehatan	6
2.3 Teknologi Pengolahan Air dalam Penyisihan Mikroplastik	8
2.4 Teknologi AOPs dalam Pengolahan Mikroplastik.....	9
2.5 Scanning Electron Microscope (SEM).....	11
2.6 Spektroskopi Fourier Transform InfraRed (FTIR)	13
2.7 Pengujian Hipotesis	15
BAB III: METODOLOGI	17
3.1 Tahapan Penelitian.....	17
3.1.1 Tahap Persiapan	18
3.1.2 Penelitian Pendahuluan.....	21
3.1.3 Penelitian Utama dan Analisis Sampel	21
3.1.4 Analisis Data dan Pembahasan	28
3.1.5 Kesimpulan dan Saran	29
BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Pengukuran Kelimpahan Serat Mikroplastik sebagai Parameter Fisik Kualitas Air	31
4.2 Degradasi Serat Mikroplastik oleh AOP O ₃ /UV	32

4.2.1 Perubahan COD dalam Air	32
4.2.2 Perubahan Morfologi Serat Mikroplastik	34
4.2.3 Perubahan Struktur Kimia Serat Mikroplastik.....	40
4.2.4 Jalur Degradasi Serat Mikroplastik.....	45
4.3 Kondisi Optimum AOP Sistem O ₃ /UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik.....	46
4.3.1 Pengaruh Intensitas UV dan Waktu Kontak terhadap Degradasi Serat Mikroplastik	46
4.3.2 Pengaruh Jenis Polimer terhadap Degradasi Serat Mikroplastik.....	48
4.3.3 Pengaruh Konsentrasi Serat Mikroplastik terhadap Degradasinya.....	48
BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN.....	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....	51
Lampiran A. Kurva Kalibrasi COD Kadar Rendah <i>Closed Reflux</i>	57
Lampiran B. Hasil Analisis COD.....	59
Lampiran C. Hasil Analisis FTIR	65
Lampiran D. Hasil Analisis GC-MS	71
Lampiran E. Hasil Analisis Statistik	75
Lampiran F. Dokumentasi Penelitian.....	85
BIOGRAFI PENULIS	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Komponen SEM	12
Gambar 2. 2 SEM Mikroplastik	12
Gambar 2. 3 Spektrum FTIR PET	14
Gambar 2. 4 Spektrum FTIR PA	14
Gambar 2. 5 Distribusi Sampel $\alpha = 0,05$	15
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian.....	17
Gambar 3. 2 <i>Oxygen Concentrator</i>	18
Gambar 3. 3 <i>Ozone Generator</i>	18
Gambar 3. 4 <i>Magnetic Stirrer</i>	19
Gambar 3. 5 Rangkaian Reaktor AOP.....	21
Gambar 3. 6 <i>Ozone Detector</i>	22
Gambar 3. 7 UVC Light Meter.....	22
Gambar 3. 8 Perangkat Penyaringan Vakum	24
Gambar 3. 9 Pengamatan Mikroplastik di Bawah Mikroskop	25
Gambar 3. 10 Alat SEM	26
Gambar 3. 11 Alat ATR-FTIR	27
Gambar 3. 12 Alat GC-MS.....	27
Gambar 4. 1 Grafik Rasio COD_t/COD_0 terhadap Waktu.....	33
Gambar 4. 2 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 30 $\mu W/cm^2$	34
Gambar 4. 3 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 30 $\mu W/cm^2$	35
Gambar 4. 4 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu W/cm^2$	35
Gambar 4. 5 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu W/cm^2$	35
Gambar 4. 6 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu W/cm^2$	35
Gambar 4. 7 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu W/cm^2$	36
Gambar 4. 8 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 30 $\mu W/cm^2$	36
Gambar 4. 9 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 30 $\mu W/cm^2$	36
Gambar 4. 10 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu W/cm^2$	37
Gambar 4. 11 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu W/cm^2$	37
Gambar 4. 12 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu W/cm^2$	37
Gambar 4. 13 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PA dengan Intenistas Iradiasi 189 $\mu W/cm^2$	37
Gambar 4. 14 Hasil SEM 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu W/cm^2$	38
Gambar 4. 15 Hasil SEM 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu W/cm^2$	39
Gambar 4. 16 Hasil SEM 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu W/cm^2$	39

Gambar 4. 17 Hasil SEM 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	39
Gambar 4. 18 Hasil SEM 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	39
Gambar 4. 19 Hasil SEM 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	40
Gambar 4. 20 Spektrum IR PET Murni	41
Gambar 4. 21 Spektrum IR PET Setelah 360 Menit Waktu Kontak.....	41
Gambar 4. 22 Spektrum IR PA Murni.....	42
Gambar 4. 23 Spektrum IR PA Setelah 360 Menit Waktu Kontak	42
Gambar 4. 24 Konversi Absorbansi Spektrum IR PET Murni	44
Gambar 4. 25 Konversi Spektrum IR PET Setelah 360 Menit Waktu Kontak	44
Gambar 4. 26 Konversi Spektrum IR PA Murni	44
Gambar 4. 27 Konversi Spektrum IR PA Setelah 360 Menit Waktu Kontak.....	45
Gambar 4. 28 Model Grafik Desain Optimal.....	47
Gambar A. 1 Kurva Kalibrasi COD Kadar Rendah.....	57
Gambar B. 1 Grafik COD Sampel Uji 0,1 mg/L PET	59
Gambar B. 2 Grafik COD Sampel Uji 0,5 mg/L PET	60
Gambar B. 3 Grafik COD Sampel Uji 0,1 mg/L PA.....	61
Gambar B. 4 Grafik COD Sampel Uji 0,5 mg/L PA.....	61
Gambar F. 1 Pembuatan Sampel Buatan.....	85
Gambar F. 2 Pengukuran Kekkeruhan	85
Gambar F. 3 Pengukuran TSS.....	86
Gambar F. 4 Operasi AOP dan Pengawetan Sampel.....	86
Gambar F. 5 Analisis Mikroplastik menggunakan Mikroskop	87
Gambar F. 6 Analisis COD Metode <i>Closed Reflux</i>	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Puncak Spektrum IR Polimer PET	13
Tabel 2. 2 Karakteristik Puncak Spektrum IR Polimer PA	13
Tabel 3. 1 Alat dan Bahan	19
Tabel 3. 2 Matriks Variasi Percobaan	22
Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran Kekeuhan	31
Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran TSS	32
Tabel 4. 3 Hasil GC-MS Sampel 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi UV 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$..	45
Tabel 4. 4 Hasil GC-MS Sampel 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi UV 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$...	46
Tabel A. 1 Data Absorbansi Larutan Kerja COD Kadar Rendah	57
Tabel B. 1 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,1 mg/L PET	59
Tabel B. 2 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,5 mg/L PET	60
Tabel B. 3 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,1 mg/L PA	60
Tabel B. 4 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,5 mg/L PA	61
Tabel B. 5 Rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ Variasi 0,1 mg/L PET	62
Tabel B. 6 Rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ Variasi 0,5 mg/L PET	62
Tabel B. 7 Rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ Variasi 0,1 mg/L PA	63
Tabel B. 8 Rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ Variasi 0,5 mg/L PA	63
Tabel C. 1 Intensitas Puncak Spektrum IR PET Murni	65
Tabel C. 2 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PET Murni	65
Tabel C. 3 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PET Setelah 360 Menit Waktu Kontak	66
Tabel C. 4 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PA Murni	67
Tabel C. 5 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PA Setelah 360 Menit Waktu Kontak	68
Tabel C. 6 Nilai <i>Carbonyl Index</i>	69
Tabel D. 1 Hasil GC-MS PET	71
Tabel D. 2 Hasil GC-MS PA	72
Tabel E. 1 Data Kelompok 0,1 mg/L PET	75
Tabel E. 2 Data Kelompok 0,5 mg/L PET	75
Tabel E. 3 Data Kelompok 0,1 mg/L PA	76
Tabel E. 4 Data Kelompok 0,5 mg/L PA	76
Tabel E. 5 Hasil Uji <i>Two-Way</i> ANOVA Kelompok 0,1 mg/L PET	77
Tabel E. 6 Hasil Uji <i>Two-Way</i> ANOVA Kelompok 0,5 mg/L PET	77
Tabel E. 7 Hasil Uji <i>Two-Way</i> ANOVA Kelompok 0,1 mg/L PA	77
Tabel E. 8 Hasil Uji <i>Two-Way</i> ANOVA Kelompok 0,5 mg/L PA	78
Tabel E. 9 Data Kelompok 0,1 mg/L 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	79
Tabel E. 10 Data Kelompok 0,1 mg/L 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	79
Tabel E. 11 Data Kelompok 0,1 mg/L 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	80
Tabel E. 12 Data Kelompok 0,5 mg/L 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	80
Tabel E. 13 Data Kelompok 0,5 mg/L 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	80
Tabel E. 14 Data Kelompok 0,5 mg/L 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	81
Tabel E. 15 Data Kelompok PET 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	81
Tabel E. 16 Data Kelompok PET 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	82
Tabel E. 17 Data Kelompok PET 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	82
Tabel E. 18 Data Kelompok PA 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	82

Tabel E. 19 Data Kelompok PA 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	83
Tabel E. 20 Data Kelompok PA 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	83

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan pesat dari industri plastik memberi banyak kemudahan dalam kehidupan sehari-hari manusia. Namun, hal tersebut juga menghasilkan sampah plastik dalam jumlah yang sangat besar dan menyebabkan berbagai macam permasalahan lingkungan. Penanganan sampah plastik yang belum ideal menyebabkan akumulasi kontaminan plastik dalam bentuk partikel dan serpihan di berbagai media seperti lautan, perairan tawar, serta lingkungan terestrial. Sampah plastik dapat bertahan untuk jangka waktu yang panjang dalam lingkungan, dan di bawah berbagai macam tekanan dari luar, sampah plastik dapat terfragmentasi menjadi partikel yang lebih kecil dan membentuk mikroplastik. Dibandingkan dengan sampah plastik biasa, mikroplastik memiliki volume yang sangat kecil, luas permukaan spesifik yang lebih besar, dan kemampuan yang cukup besar untuk polutan lain melekat, sehingga mendukung terjadinya pencemaran. Beberapa tahun terakhir, pencemaran oleh mikroplastik menjadi perhatian luas dan telah dilakukan berbagai macam riset terhadap sumber, metode analisis, dan risiko dari mikroplastik itu sendiri (Gong & Xie, 2020).

Dari waktu ke waktu, berbagai penelitian mendefinisikan mikroplastik dengan rentang ukuran yang bermacam-macam, tetapi definisi mikroplastik yang paling terkini dan paling umum digunakan menurut para ahli merupakan seluruh partikel plastik yang diameternya kurang dari 5 mm (Hartmann et al., 2019). Terdapat dua macam mikroplastik berdasarkan pembentukannya, yaitu mikroplastik primer dan sekunder. Mikroplastik primer merupakan plastik yang pada dasarnya didesain berukuran mikro, contohnya adalah *microbeads* dalam produk kecantikan dan pembersih. Sedangkan mikroplastik sekunder berasal dari fragmentasi plastik yang berukuran besar pada saat penggunaan maupun setelah dibuang (Hale et al., 2020). Keberadaan mikroplastik di lingkungan dapat berasal dari limpasan dari daerah perkotaan, pertanian, dan rekreasi serta pembuangan sampah plastik secara sembarangan, limbah industri, sumber atmosferik, dan efluen Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Di lingkungan, mikroplastik dapat mengalami perpindahan dan transformasi melalui beberapa mekanisme yaitu sedimentasi, fragmentasi, dan konsumsi (Picó & Barceló, 2019).

Mikroplastik telah ditemukan di berbagai media, dari tanah hingga perairan seperti laut, sungai, garis pantai, dan rawa serta pada saluran pencernaan vertebrata maupun invertebrata. Karakteristik dari mikroplastik, termasuk kelimpahan, ukuran, bentuk, dan komponennya telah dipelajari dan dilaporkan untuk daerah perkotaan, pinggir kota, dan daerah terpencil (Y. Zhang et al., 2020). Menurut hasil penelitian K. Zhang et al. (2017) mengenai keberadaan dan karakteristik mikroplastik pada air permukaan di salah satu waduk di Cina, mikroplastik teridentifikasi berupa jenis *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), dan *expanded polystyrene* (PS). Klasifikasi mikroplastik berdasarkan ukurannya dapat dibagi menjadi 3 kategori yaitu 0,112-0,5 mm; 0,5-1 mm; dan 1-5 mm. selain itu mikroplastik juga dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuknya, yaitu berupa serat (*fiber*), *sheet*, serpihan (*fragment*), pelet dan *foam*.

Mikroplastik juga telah teridentifikasi di perairan Kota Surabaya, yaitu pada Sungai Surabaya. Rata-rata tertinggi kelimpahan mikroplastik sepanjang Sungai Surabaya adalah sebesar 21,16 partikel/m³ (Lestari et al., 2020). Permasalahan timbul akibat kenyataan bahwa Sungai Surabaya digunakan sebagai sumber air baku. Ada pula penelitian yang

telah dilakukan oleh Radityaningrum et al. (2021) tentang kontaminasi mikroplastik pada penyediaan air di Kota Surabaya. Penelitian tersebut melaporkan kelimpahan mikroplastik sebesar 26,8-35 partikel/L dalam air baku di unit *intake* dua IPAM di Surabaya dengan didominasi jenis serat (*fiber*) sebesar 24,7-33,1 partikel/L. Efisiensi teknologi konvensional pada instalasi pengolahan dalam penyisihan mikroplastik sudah terbilang tinggi, namun terdapat fragmentasinya yang masih tertinggal dalam air olahan yang jika dikonsumsi akan membahayakan kesehatan (Enfrin et al., 2019).

Jika dikonsumsi, mikroplastik dapat menimbulkan efek fisik dan kimia pada organisme yang terpapar. Efek fisik berkaitan dengan ukuran, bentuk, dan konsentrasi mikroplastik itu sendiri. Sedangkan efek kimia berhubungan dengan bahan berbahaya yang berkaitan dengan mikroplastik. Mikroplastik dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui sistem pencernaan dan pernapasan. Beberapa literatur menyebutkan bahwa paparan mikroplastik dapat menyerang sistem saraf, sistem pernapasan, sistem ekskresi, sistem pencernaan, dan kulit (Campanale et al., 2020). Saat ini belum terdapat peraturan resmi yang mengatur keberadaan mikroplastik di lingkungan sehingga belum banyak upaya pengendalian yang dilakukan untuk mengurangnya. Namun, melihat jumlah dan efek yang mungkin timbul, perlu segera dilakukan pemantauan dan upaya pengurangan mikroplastik dalam perairan.

Pengolahan yang berpotensi untuk menyisihkan polutan berukuran mikro salah satunya adalah *advanced oxidation processes* (AOPs) berbasis O₃/UV. AOPs merupakan proses kimia yang melibatkan pembentukan senyawa oksidan yang sangat reaktif, yang paling utama adalah berupa radikal hidroksil (*OH). Berdasarkan mekanisme pembentukannya, AOPs dibagi menjadi 3 macam yaitu AOPs kimia, fotokimia, dan elektrokimia. Berdasarkan beberapa literatur, jenis AOPs yang paling banyak diimplementasikan dengan skala besar untuk pengolahan air limbah adalah AOPs menggunakan kombinasi ozon (O₃), hidrogen peroksida (H₂O₂), dan/atau iradiasi sinar UV (Wardenier et al., 2019). Sebuah penelitian mengenai degradasi mikroplastik menggunakan AOP fotokatalitik di atas lapisan nanopartikel TiO₂ dengan iradiasi sinar UV telah dilakukan dan didapati efisiensi degradasi mikroplastik jenis *polystyrene* (PS) mencapai 98,4% dengan CO₂ sebagai hasil dari dekomposisi tersebut. Kelemahan dalam percobaan tersebut adalah diperlukan penyaringan mikroplastik sebelum penerapan AOP (Nabi et al., 2020).

Belum banyak riset yang mempelajari tentang pengolahan mikroplastik dalam air menggunakan AOPs selain sistem fotokatalitik dan fenton (Ricardo et al., 2021) sehingga pada penelitian ini akan diterapkan AOP berbasis O₃/UV untuk degradasi mikroplastik terutama jenis serat dan menentukan pengaruh intensitas sinar UV, jenis polimer pembentuk serat mikroplastik dan konsentrasinya terhadap efisiensi operasi dan pengolahannya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana efektivitas AOP berbasis O₃/UV untuk mendegradasi dan memineralisasi serat mikroplastik dalam sampel air buatan?
- b. Bagaimana kondisi optimum operasi yang dibutuhkan AOP berbasis O₃/UV untuk mendegradasi dan memineralisasi serat mikroplastik dalam sampel air buatan?

1.3 Ruang Lingkup

Penelitian tugas akhir memiliki ruang lingkup untuk membatasi penelitian yang dilakukan. Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengolahan Air dan Gedung *Workshop* Departemen Teknik Lingkungan ITS.
- b. Sampel air yang digunakan adalah sampel air buatan dari serat benang *polyester* (PET) dan *nylon* (PA).
- c. Operasi pengolahan yang dilakukan berskala laboratorium dan menggunakan sistem *batch*.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Menguji efektivitas AOP berbasis O_3/UV untuk mendegradasi dan memineralisasi serat mikroplastik dalam sampel air buatan.
- b. Menentukan kondisi optimum operasi AOP berbasis O_3/UV untuk mendegradasi dan memineralisasi serat mikroplastik dalam sampel air buatan.

1.5 Manfaat

Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar pengembangan teknologi pengolahan yang dapat memineralisasi mikroplastik dalam air yang bermanfaat untuk:

- a. Menghilangkan secara total mikroplastik dalam air minum sehingga tidak mengganggu Kesehatan.
- b. Mengurangi dampak kontaminasi mikroplastik bagi makhluk hidup termasuk biota akuatik dan manusia.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Mikroplastik dan Fenomenanya

Mikroplastik umumnya didefinisikan sebagai polimer sintetik yang berukuran 5 mm atau lebih kecil (Li et al., 2018). Terdapat dua kategori mikroplastik berdasarkan pembentukannya, yaitu mikroplastik primer dan sekunder. Mikroplastik primer adalah mikroplastik yang dari awal diproduksi berukuran mikro untuk penggunaan industrial maupun domestik seperti pelet resin dalam industri plastik, *facial scrub*, pasta gigi, sabun, *lotion*, dan sebagainya. Produk-produk tersebut banyak digunakan sehari-hari oleh masyarakat luas. Saat digunakan, mikroplastik dalam produk kosmetik dibilas dan terbawa oleh air limbah domestik sehingga dapat berakhir di lingkungan (Carr et al., 2016). Sedangkan mikroplastik sekunder terbentuk dari proses fragmentasi makroplastik (Auta et al., 2017). Fragmentasi dari makroplastik dapat terjadi melalui beberapa mekanisme seperti foto-oksidasi oleh sinar UV, hidrolisis, pemecahan secara mekanis akibat abrasi pasir, turbulensi air, atau juga akibat bio-asimilasi oleh mikroorganisme (Enfrin et al., 2019). Selain itu, mikroplastik juga dapat dikategorikan berdasarkan ukuran, bentuk, dan jenis polimernya. Berdasarkan diameternya, mikroplastik dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu *Large Microplastics* (LMP) dan *Small Microplastics* (SMP) di mana LMP adalah mikroplastik berdiameter 1-5 mm dan SMP adalah mikroplastik berdiameter 1 μ m-1 mm (Lestari et al., 2020). Berdasarkan bentuknya, mikroplastik umum ditemukan berupa serat, kepingan, dan pelet. Sedangkan kategori berdasarkan jenis polimernya antara lain adalah *polyethylene* (PE), *low density PE* (LDPE), *PE terephthalate* (PET), *polyacrylates* (PS), dan lain-lain (Picó & Barceló, 2019).

Mikroplastik dapat dihasilkan dari sumber daratan maupun lautan. Sumber lautan yang biasanya timbul dari penangkapan ikan komersial, pelayaran dan aktivitas lain yang dilakukan di lautan hanya berkontribusi sebesar 20% terhadap sampah mikroplastik yang berakhir di laut. Sebanyak 80% sisanya berasal dari sumber daratan (Li et al., 2018). Sumber yang dimaksud adalah pembuangan akhir sampah, pengolahan air limbah, penggunaan ban, peluruhan cat, dan pencucian tekstil (Hale et al., 2020). Saat mikroplastik dari sumber daratan terlepas ke sistem perairan, Sebagian besar dari mikroplastik tersebut akan pergi menuju lautan melalui sungai, sedangkan sisanya akan tetap tinggal di lingkungan air tawar, termasuk sistem perairan terpencil seperti di danau pegunungan. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi jangkauan distribusi mikroplastik yaitu angin, arus geostropik, turbulensi serta efek oseanografi lainnya. Selain itu karakteristik fisik dari mikroplastik itu sendiri seperti densitas, bentuk, dan ukuran juga dapat mempengaruhi transportasi dan distribusinya (Li et al., 2018).

Salah satu sungai yang tercemar mikroplastik adalah Sungai Surabaya, yang merupakan cabang dari Sungai Brantas (Lestari et al., 2020). Sungai ini mengalir menuju Selat Madura dan juga membentuk perbatasan antara Kabupaten Sidoarjo dan Gresik. Pada aliran Sungai Surabaya yang melewati tengah Kota Surabaya terdapat berbagai kegiatan domestik maupun industri dari kawasan perdagangan, perkantoran, pemukiman padat penduduk, dan industri yang berpotensi menimbulkan pencemaran pada Sungai Surabaya (Kurnianto, 2019). Pada penelitian terhadap kelimpahan mikroplastik di Sungai Surabaya oleh Lestari et al. (2020), dilakukan pengambilan sampel di sembilan lokasi sepanjang sungai

tersebut. Pengambilan sampel di setiap lokasi dilakukan pada tiga kedalaman yang berbeda yaitu bagian permukaan, tengah, dan dasar sungai. Kisaran kelimpahan mikroplastik yang didapat pada permukaan seluruh lokasi pengambilan sampel adalah 1,47-43,11 partikel/m³. Sedangkan pada bagian tengah didapat kelimpahan mikroplastik sebesar 0,76-12,56 partikel/m³. Sementara kelimpahan mikroplastik yang terdeteksi pada bagian dasar sungai berkisar dari 1,43-34,63 partikel/m³. Selain kelimpahannya, karakteristik dari mikroplastik yang ditemukan juga diperhatikan. Berdasarkan bentuknya, ditemukan 5 jenis mikroplastik yaitu *film*, serpihan (*fragment*), serat (*fiber*), *foam*, dan pelet. Bentuk yang paling dominan di setiap titik kedalaman adalah bentuk *film*, yaitu sebanyak 45,8-92,9% pada permukaan, 57,1-88% pada bagian tengah, dan 63,4-88,7% pada bagian dasar sungai. Berdasarkan ukurannya, Sebagian besar mikroplastik yang ditemukan merupakan LMP (1-5 mm). Pada bagian permukaan sebanyak 43,1-93,2%, bagian tengah sebanyak 40,4-84,5%, dan bagian dasar sebanyak 34,7-83,9%. Berdasarkan warnanya, ditemukan 6 jenis mikroplastik yaitu berwarna merah, putih, transparan, kuning, hitam, dan biru. Dalam hal ini mikroplastik transparan mendominasi yaitu pada bagian permukaan sebanyak 26,2-73,9%, bagian tengah sebanyak 33,1-79,9%, dan pada bagian dasar sebanyak 33,1-65%. Selain itu juga ditemukan 5 jenis polimer mikroplastik, yaitu *polyethylene terephthalate* (PET), *polyethylene* (PE), *polystyrene* (PS), *polypropylene* (PP), dan *low density PE* (LDPE). Sebagian besar mikroplastik yang ditemukan adalah berupa LDPE, yaitu sebanyak 44-68% pada bagian permukaan, 39-73% pada bagian tengah, dan 39-73% pada bagian dasar sungai. Mikroplastik tidak tersebar merata dalam setiap kolom air karena keberadaannya dipengaruhi karakteristik mikroplastik itu sendiri seperti densitas, bentuk, dan ukurannya. Selain itu pengaruh lingkungan seperti jenis air, jenis aliran, dan keadaan arus juga mempengaruhi persebaran mikroplastik pada kolom air (Picó & Barceló, 2019).

Sungai Surabaya merupakan sumber air baku untuk air bersih yang digunakan masyarakat setempat, sehingga selanjutnya telah dilakukan pula penelitian terhadap kelimpahan mikroplastik dalam sistem pengolahan air bersih di Surabaya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Radityaningrum et al. (2021) tentang kontaminasi mikroplastik dalam penyediaan air bersih di Surabaya, didapati kelimpahan mikroplastik sebesar 26,8-35 partikel/L dalam air baku yang diambil dari *intake* dua instalasi pengolahan air minum yang ada di Surabaya. Identifikasi mikroplastik menurut karakteristiknya juga telah dilakukan. Berdasarkan ukurannya, mikroplastik dibagi menjadi empat kategori yaitu 1-100; 101-350; 351-1000; dan 1001-5000 μm . Didapatkan mikroplastik berukuran 351-1000 μm atau termasuk kategori SMP, mendominasi mikroplastik yang ada pada kedua sampel air baku, yaitu sebanyak 45-50%. Berdasarkan bentuknya, ditemukan empat jenis mikroplastik yaitu berbentuk serat, serpihan, *film*, dan pelet. Didapatkan jenis serat paling banyak di antara bentuk lainnya yaitu sebanyak 93-95%. Mikroplastik juga ditemukan dalam berbagai warna, yaitu hitam, biru, merah, kuning, dan transparan. Mikroplastik yang paling banyak ditemukan adalah berwarna hitam yaitu sebanyak 36,2-54,3%. Sedangkan berdasarkan jenis polimernya, mikroplastik yang ditemukan berupa *cellophane*, *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *low density PE* (LDPE), *polytrimoliticamide*, *polyamide* (PA) 6, PA 6.6, dan *polyethersulfone* (PES).

2.2 Efek Mikroplastik terhadap Lingkungan dan Kesehatan

Studi mengenai efek keberadaan mikroplastik terhadap lingkungan telah banyak dilakukan terutama terhadap ekosistem laut di mana memang perhatian terhadap permasalahan mikroplastik di laut lebih besar. Seperti yang telah disebutkan, mikroplastik

yang terlepas ke lautan dapat berasal dari sumber daratan. Dalam perjalanannya, Sebagian mikroplastik tidak hanya tertinggal di perairan tawar tetapi juga di daratan. Belum banyak penelitian yang dilakukan untuk menentukan efek mikroplastik dalam tanah, namun dari hasil yang sudah ada, terdapat hipotesis bahwa keberadaannya berpotensi merusak ekosistem daratan. Hal-hal yang mungkin terdampak dari adanya mikroplastik dalam tanah adalah kualitas tanah, fauna, dan tumbuhan. Mikroplastik dalam tanah dapat mempengaruhi karakteristik fisiknya bergantung pada jenis dari mikroplastik itu sendiri. Mikroplastik yang bentuk dan ukurannya serupa dengan partikel tanah memiliki efek yang lebih tidak menonjol terhadap struktur tanah dan siklus air di dalamnya. Hal ini disimpulkan dari hasil suatu penelitian di mana serat *polyester* dapat mengurangi densitas dan stabilitas agregat tanah basah, serta menambah kapasitas retensi air dan evapotranspirasi secara signifikan. Sedangkan mikroplastik jenis lain seperti serpihan PE atau butiran *polyamide*, dapat menimbulkan efek yang lebih kecil. Perlu dilakukan studi lebih lanjut terhadap dampak lainnya karena sejauh ini baru disimpulkan berdasarkan efek mikroplastik dalam tanah serta uji laboratorium yang dilakukan tidak pada media tanah (Xu et al., 2020).

Sebagian besar permasalahan ekosistem laut yang disebabkan oleh mikroplastik timbul akibat interaksinya dengan biota laut. Peningkatan timbunan mikroplastik di laut juga diiringi dengan peningkatan ketersediaan hayati dari mikroplastik itu sendiri terhadap organisme laut. Mikroplastik kerap disalah pahami sebagai makanan oleh biota laut dan tidak sengaja termakan. Beberapa organisme yang kerap tidak sengaja menelan mikroplastik antara lain adalah zooplankton, protozoa, ikan, burung, serta mamalia laut. Konsumsi mikroplastik oleh zooplankton dapat mengawali akumulasi mikroplastik dalam hewan-hewan yang berada di tingkat rantai makanan di atasnya dan hal tersebut dapat menimbulkan bahaya (Gong & Xie, 2020). Berbagai macam zat aditif ditambahkan pada saat produksi plastik untuk mengembangkan komponen fisiknya seperti warna, ketahanan terhadap api, dan kepadatan. Zat aditif tersebut dapat berupa senyawa polimer, organik maupun anorganik. Zat-zat tersebut memiliki efek beracun terhadap makhluk hidup yang dapat terjadi melalui beberapa mekanisme (Li et al., 2018). Mikroplastik yang dikonsumsi oleh makhluk hidup dapat menimbulkan bahaya kimia maupun bahaya fisik. Setelah dikonsumsi oleh organisme laut, mikroplastik dapat menimbulkan efek mekanis seperti melekatnya terhadap permukaan saluran yang dilaluinya yang kemudian dapat menghambat pergerakan dan menyumbat saluran pencernaan, atau juga dapat menimbulkan efek kimia seperti inflamasi, *hepatic stress*, dan menghambat pertumbuhan (Auta et al., 2017) Berdasarkan analisis terhadap berbagai macam hasil riset oleh Eerkes-Medrano & Thompson (2018), setelah mikroplastik memasuki sistem pencernaan, mikroplastik mengalami perpindahan dari satu sel membran ke yang lain. Contohnya pada *Mytilus edulis*, mikroplastik yang dimakan dan mencapai sistem pencernaan dapat ter-endositosis oleh sel yang ada pada sistem kardiovaskular. Akumulasi mikroplastik dalam sistem pencernaan dapat mempengaruhi perolehan nutrisi dan penyimpanan energi dengan mengurangi pemasukan makanan atau rasa kenyang yang palsu. Nutrisi yang tidak cukup dapat menyebabkan hambatan pada pertumbuhan, reproduksi, serta dapat mengurangi jangka hidup suatu organisme.

Selain bahaya yang timbul akibat interaksi biota laut dengan mikroplastik, bahaya juga bisa datang dari kemampuan mikroplastik yang dapat menjadi media transfer suatu senyawa tertentu akibat luas permukaan spesifiknya yang besar dan hidrofobisitas intrinsiknya. Mikroplastik dapat menjadi media polutan hidrofobik yang mengalami transpor dan distribusi melalui air. Contohnya adalah *polychlorinated biphenyls* (PSBs) dan *dichlorodiphenyltrichloroethane* (DDT) yang umum diketahui sebagai senyawa yang sangat beracun dan persisten dalam lingkungan (Li et al., 2018). Selain polutan hidrofobik,

mikroplastik juga berpotensi untuk mengadsorpsi logam berat. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Holmes et al. (2012), didapati jejak logam seperti Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd dan Pb pada butiran mikroplastik yang diambil dari pantai dan sedimen di Inggris Barat Daya. Diasumsikan bahwa adsorpsi logam berat terjadi melalui reaksi antara kation divalen (seperti Cu^{2+} , Cd^{2+} , dan Pb^{2+}) dan oksianion (seperti $\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$) dengan permukaan plastik yang bermuatan. Selain itu juga dapat melalui reaksi antara kompleks logam organik netral dengan permukaan hidrofobik dari plastik itu sendiri.

Senyawa-senyawa tersebut berpotensi melekat pada permukaan mikroplastik kemudian terbawa sehingga dapat terdistribusi lebih luas bahkan terakumulasi dalam rantai makanan (Li et al., 2018). Sehingga efek toksik yang dapat terjadi tidak hanya dari plastik itu sendiri dan kandungan aditifnya, tetapi juga akibat polutan-polutan lain yang melekat di permukaannya (Gong & Xie, 2020).

Dari persebaran kelimpahan mikroplastik di lingkungan, mikroplastik dapat berakhir dalam tubuh manusia. Jalur masuk terbesar mikroplastik ke dalam tubuh manusia adalah melalui konsumsi makanan yang telah terkontaminasi. Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan, didapati mikroplastik sebanyak 0,44 MP/gram di dalam gula, 0,11 MP/gram di dalam garam, 0,03 MP/gram di dalam alkohol, dan 0,09 MP/gram di dalam air minum kemasan. Ada pula asumsi bahwa manusia dapat mengonsumsi sebanyak 80 gram mikroplastik tiap harinya dari tumbuhan-tumbuhan (buah dan sayur) yang di dalamnya telah terakumulasi mikroplastik dari tanah yang tercemar (Campanale et al., 2020). Setelah memasuki sistem pencernaan, mikroplastik dapat melepaskan zat aditif dan senyawa beracun yang sebelumnya melekat di permukaannya yang dapat menyebabkan berbagai gangguan Kesehatan (Cox et al., 2019). Salah satu senyawa beracun yang telah disebutkan sebelumnya adalah logam berat. Logam berat dalam konsentrasi yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan sel dan jaringan tubuh yang selanjutnya dapat berujung efek-efek merugikan dan berbagai macam penyakit pada manusia. Al, Sb, Ba, Cd, Cr (ii), Co, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Sn, dan V adalah *metallo estrogen* yaitu senyawa yang memiliki afinitas dengan reseptor estrogen akibat kemampuannya untuk meniru aktivasi estrogen. Karena hal tersebut, golongan logam berat ini dianggap berbahaya dan berpotensi menyebabkan kanker payudara. Ada pula titanium oksida yang banyak digunakan sebagai aditif dalam produk plastik yang telah terbukti menghasilkan sitotoksitas pada paru-paru epitel dan sel usus besar manusia (Campanale et al., 2020).

Jalur masuk mikroplastik ke dalam tubuh manusia selain melalui konsumsi adalah melalui sistem pernapasan. Mikroplastik terlepas ke udara dari berbagai sumber, termasuk tekstil sintetis, abrasi dari bahan-bahan tertentu seperti ban mobil dan bangunan, serta resuspensi mikroplastik pada permukaan beda (Prata et al., 2020). Persebaran mikroplastik di udara yang kemudian dihirup oleh manusia dapat menyebabkan gangguan pernapasan, efek sitotoksik dan inflamasi, serta penyakit autoimun pada pria (Campanale et al., 2020).

2.3 Teknologi Pengolahan Air dalam Penyisihan Mikroplastik

Mikroplastik banyak diproduksi dalam produk perawatan diri yang digunakan sehari-hari oleh manusia, seperti sabun dan pasta gigi. Setelah digunakan, mikroplastik di dalam produk tersebut akan terbawa oleh air limbah domestik. Partikel mikroplastik tersebut bersama sampah plastik lainnya dapat berakhir di instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Karena itu, IPAL disebut sebagai salah satu sumber pencemaran mikroplastik dalam air (Carr et al., 2016). Mikroplastik dapat memasuki lingkungan air tawar melalui efluen IPAL, di

mana air tawar merupakan sumber utama air baku yang digunakan untuk penyediaan air minum (Shen et al., 2020). Karena kekhawatiran terhadap efek dari mikroplastik terhadap lingkungan dan kesehatan makhluk hidup, telah dilakukan beberapa kajian mengenai teknologi penyisihan mikroplastik. Mikroplastik dapat disisihkan oleh berbagai macam teknologi konvensional yang digunakan pada IPAL maupun IPAM, seperti *grit chamber* dan prasedimentasi, koagulasi, filtrasi, dan proses *activated sludge* (Bui et al., 2020).

Salah satu IPAL yang telah dipelajari penyisihannya terhadap mikroplastik adalah IPAL perkotaan yang terletak di Kota Cartagena, Spanyol. Instalasi pengolah tersebut terdiri dari unit *grit and grease removal*, *primary clarifier*, reaktor *activated sludge*, dan *secondary clarifier*. Dalam influen IPAL tersebut didapati rerata kelimpahan mikroplastik sebesar 3,2 partikel/L dan terus berkurang sejalan dengan pengolahan yang dilalui. Setelah melalui *grit and grease removal*, kelimpahan mikroplastik berkurang menjadi 2,59 partikel/L. selanjutnya, setelah unit *primary clarifier*, didapati mikroplastik sebanyak 2,13 partikel/L. Terakhir, setelah melalui unit *activated sludge* dan *secondary clarifier*, kelimpahan mikroplastik ditemukan sebanyak 0,31 partikel/L sehingga menghasilkan penyisihan mikroplastik total sebesar 90,3% (Bayo et al., 2020). Penyisihan mikroplastik juga telah dipelajari pada IPAM Kota Surabaya, Indonesia. Instalasi tersebut terdiri dari unit *intake*, aerasi, prasedimentasi, koagulasi, flokulasi-sedimentasi, filtrasi, desinfeksi menggunakan klorin, dan reservoir. Pengambilan sampel dilakukan pada *intake* dan saluran setiap unit. Pada unit *intake*, didapati kelimpahan mikroplastik sebanyak 26,8-35 partikel/L. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Bayo et al. (2020), kelimpahan mikroplastik berangsur menurun setelah melalui serangkaian pengolahan yang ada. Efisiensi penyisihan mikroplastik pada setiap unit pengolahan air minum di Surabaya adalah 45-47% untuk unit aerasi, 37-39% untuk unit prasedimentasi, 17% untuk unit koagulasi, 26% untuk unit filtrasi, dan 11-71% untuk unit desinfeksi. Secara keseluruhan, efisiensi penyisihan mikroplastik yang dapat dicapai oleh IPAM Kota Surabaya sebesar 54-76% (Radityaningrum et al., 2021).

Walaupun penyisihan mikroplastik oleh teknologi konvensional sudah terbilang baik, terdapat beberapa permasalahan. Terdapat kejadian di mana setelah melalui pengolahan, kelimpahan mikroplastik justru bertambah. Hal ini mungkin terjadi akibat fragmentasi partikel oleh gesekan antara mikroplastik dengan media yang digunakan pada pengolahan terkait (Radityaningrum et al., 2021). Fragmentasi mikroplastik dalam pengolahan dapat membentuk mikroplastik yang lebih kecil yang masih tertinggal di efluen suatu pengolahan air (Enfrin et al., 2019). Permasalahan lainnya adalah mikroplastik yang tersisihkan bersama pencemar lainnya pada pengolahan yang telah disebutkan memang mengurangi partikel mikroplastik yang akan terlepas ke badan air, tetapi mikroplastik tersebut tidak hilang melainkan berpindah ke lumpur hasil pengolahan. Lumpur tersebut dapat menjadi sumber pencemaran mikroplastik di lingkungan jika dimanfaatkan kembali sehingga diperlukan solusi untuk mengurangi pencemaran mikroplastik baik dalam efluen maupun produk samping dari pengolahan air itu sendiri (Freeman et al., 2020).

2.4 Teknologi AOPs dalam Pengolahan Mikroplastik

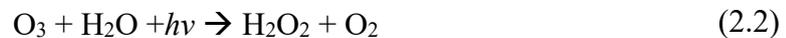
Advanced oxidation processes (AOPs) merupakan teknologi yang memanfaatkan hidroksil atau sulfat radikal kuat sebagai agen oksidasi utama untuk pengolahan air. AOPs diaplikasikan umumnya untuk eliminasi kontaminan organik dan anorganik pada air maupun air limbah. Dalam pengolahan air, agen oksidasi yang kuat tersebut diharapkan dapat mengubah polutan menjadi produk yang tidak berbahaya dan aman untuk lingkungan. Terdapat beberapa sistem AOPs yaitu antara lain yang berbasis radikal hidroksil, ozon, sinar

UV, fenton, dan radikal sulfat (Deng & Zhao, 2015). Salah satu yang umum digunakan dan berpotensi untuk mengolah mikropolutan adalah AOPs berbasis O₃/UV (Wardenier et al., 2019).

Menurut Deng & Zhao, (2015), ozon merupakan oksidan kuat namun cukup selektif untuk bereaksi. Ozon cenderung bereaksi dengan senyawa organik yang terionisasi daripada senyawa organik dalam keadaan netral. Dalam kondisi tertentu, radikal hidroksil dihasilkan oleh ozon untuk menginisiasi oksidasi dengan mekanisme tidak langsung. Reaksi keseluruhan untuk menghasilkan radikal hidroksil (*OH) adalah sebagai berikut,



Dengan keberadaan oksidan lain atau dengan iradiasi, radikal hidroksil yang dihasilkan dapat meningkat secara signifikan. Contohnya adalah dengan H₂O₂ dan sinar UV. Dengan iradiasi sinar UV, H₂O₂ sebagai oksidan tambahan dapat dihasilkan melalui fotolisis ozon. Berikut reaksinya,

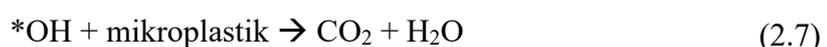
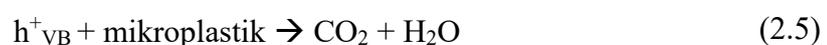


Kemudian fotolisis H₂O₂ akan menghasilkan radikal hidroksil. Berikut reaksinya,



Degradasi hingga mineralisasi mikroplastik menggunakan AOPs telah dipelajari oleh Nabi et al. (2020). AOP yang diterapkan berbasis iradiasi UV dengan TiO₂ sebagai fotokatalis. Lapisan TiO₂ difabrikasi pada filter mikroplastik dengan menggunakan air, etanol, dan Triton X-100 sebagai katalis. Penerapan AOP dilakukan terhadap butiran *polystyrene* (PS) berukuran 400 nm dalam fase padatan. Setelah iradiasi UV selama 12 jam, terdapat perubahan ukuran pada butiran PS yang diamati. Perubahan yang paling signifikan terjadi pada penerapan Triton X-100 sebagai katalis, yaitu mencapai 100,07 nm. Selanjutnya pada penggunaan etanol, didapat reduksi ukuran hingga 177,78 nm dan untuk penggunaan air didapat reduksi ukuran hingga 268,18 nm. Perbedaan hasil tersebut dapat dipengaruhi oleh ikatan energi, luas permukaan, morfologi, pemisahan muatan, penyerapan cahaya, dan teksturnya. Triton X-100 menunjukkan performa yang lebih baik karena ikatan energinya yang rendah dan pemisahan muatan yang baik sehingga menghasilkan lebih banyak elektron bebas di bawah iradiasi UV dan meningkatkan penyisihan PS. Setelah 12 jam iradiasi UV, didapat efisiensi degradasi sebesar 69,25%, 91,04%, dan 98,4% untuk penggunaan lapisan air, etanol, dan Triton X-100.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Nabi et al. (2020), konsentrasi CO₂ juga diperhatikan sepanjang reaksi fotodegradasi. Konsentrasinya terus meningkat selama reaksi yang menandakan bahwa CO₂ diproduksi dari proses mineralisasi PS. Fotodegradasi dari PS dalam fase padatan terjadi akibat adanya oksidan reaktif seperti radikal hidroksil dan superoksida. Sinar UV menstimulasi TiO₂ untuk memproduksi elektron pada ikatan konduksi (e⁻_{CB}) dan *positive hole* pada ikatan valensi (h⁺_{VB}). h⁺_{VB} merupakan oksidator yang kuat dan mampu mengoksidasi senyawa organik dan menghasilkan CO₂ dan H₂O. h⁺_{VB} juga dapat menghasilkan radikal hidroksil yang memiliki kemampuan yang sama. Berikut reaksinya,



Selain itu, e^-_{CB} juga dapat bereaksi dengan oksigen dan membentuk radikal superoksida. Superoksida kemudian akan bereaksi dengan air dan menghasilkan $*OOH$ yang dapat membentuk H_2O_2 . H_2O_2 kemudian dapat berubah menjadi radikal hidroksil dan mendegradasi mikroplastik.

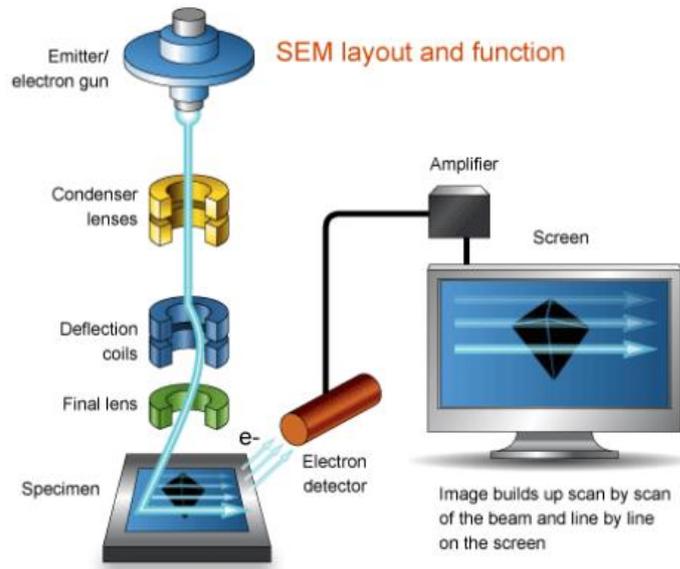


Terdapat kelemahan dari penerapan AOP fotokatalitik ini karena didapati bahwa efisiensi mineralisasi yang tinggi hanya bisa dicapai pada reaksi antara TiO_2 dan mikroplastik dalam fase padatan. Setelah iradiasi UV selama 12 jam penerapannya terhadap mikroplastik dalam air, hanya didapat efisiensi di bawah 40%. Hal ini dapat terjadi akibat berkurangnya kemungkinan terjadi reaksi antara hidroksil radikal maupun elektron bebas dengan partikel mikroplastik dalam air karena kontak antara TiO_2 dan mikroplastik menjadi sukar. Sedangkan pada antarmuka padatan TiO_2 dengan padatan partikel mikroplastik, kontak komponen reaktif dengan partikel mikroplastik terfasilitasi sehingga dapat dicapai efisiensi fotodegradasi yang lebih tinggi (Nabi et al., 2020). Penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan teknologi AOPs dalam memineralsasi mikroplastik dalam air.

2.5 Scanning Electron Microscope (SEM)

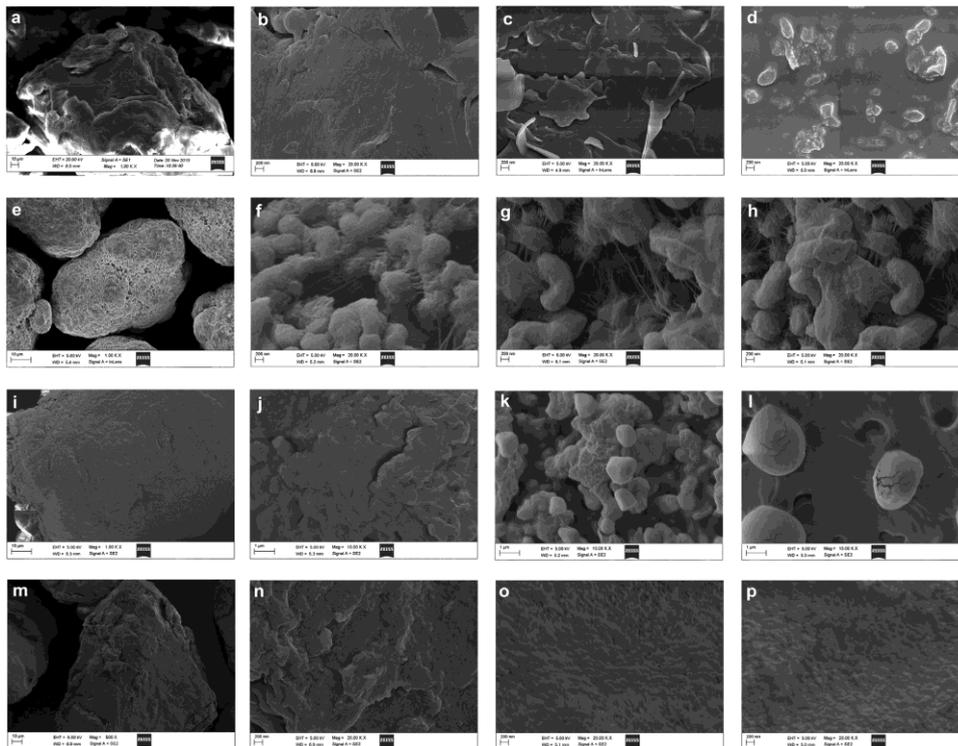
Scanning Electron Microscope (SEM) adalah mikroskop elektron yang menghasilkan gambaran permukaan suatu sampel dengan pemindaian menggunakan sinar elektron yang terfokus. Analisis SEM telah digunakan di seluruh dunia karena efektif dalam menganalisis bahan organik maupun anorganik dalam skala nano hingga mikrometer. SEM dapat menghasilkan gambar dengan perbesaran yang tinggi mencapai 300.000x dan dapat digunakan untuk berbagai macam material (Abdullah & Mohammed, 2019). Sinar elektron yang ditembakkan pada sistem SEM difokuskan pada satu titik kemudian sinar tersebut memindai spesimen yang diamati secara berurutan. Sinyal akan dihasilkan dari setiap lokasi yang dipindai dan dikumpulkan oleh detektor. Sinyal detektor disesuaikan dengan lokasi yang ada di permukaan spesimen dan intensitasnya digunakan untuk memodulasi piksel gambar yang sesuai (Inkson, 2016).

Metode utama untuk mengetahui keberadaan mikroplastik adalah secara visual menggunakan mikroskop. Namun dalam beberapa kasus, analisa di bawah mikroskop cahaya tidak cukup untuk mengetahui pengaruh suatu pengolahan terhadap mikroplastik. Oleh karena itu, SEM sudah banyak digunakan untuk melihat adanya perubahan fisik dari mikroplastik setelah mengalami degradasi (Lin et al., 2020; Song et al., 2017; Zhu et al., 2020).



Gambar 2. 1 Komponen SEM

Sumber: Abdullah & Mohammed (2019)



Gambar 2. 2 SEM Mikroplastik

Sumber: Lin et al. (2020)

2.6 Spektroskopi Fourier Transform InfraRed (FTIR)

Fourier transform infrared atau biasa disingkat FTIR, merupakan metode spektroskopi infrared yang umum digunakan. Dalam spektroskopi infrared (IR), sampel dilewati radiasi IR kemudian sebagian dari radiasi tersebut akan diserap dan sebagian lainnya akan melewati sampel. Spektrum yang dihasilkan menggambarkan serapan dan transmisi molekul yang menunjukkan identitas molekul sampel terkait. Setiap material memiliki komposisi yang unik dan susunan atom yang berbeda sehingga tidak ada bahan yang menghasilkan spektrum IR yang sama persis. Karena itu, spektroskopi IR dapat menghasilkan identifikasi positif dari segala macam material. Selain itu, ukuran puncak pada spektrum yang dihasilkan merupakan indikasi dari banyaknya material yang ada. Maka dari itu, spektroskopi IR sangat berguna untuk berbagai macam analisis dan telah digunakan untuk analisis material selama lebih dari 70 tahun. Suatu spektrum IR menggambarkan identitas suatu sampel dengan puncak serapan yang sesuai dengan frekuensi vibrasi antara ikatan atom yang membentuk suatu material (Dutta, 2017).

FTIR merupakan metode yang ideal untuk mendeteksi mikroplastik karena bersifat non-destruktif, membutuhkan sedikit preparasi sampel, dan kemampuannya menghasilkan spektrum absorpsi IR untuk bahan yang tebal dan tidak tembus cahaya (Harrison et al., 2012). Selain itu FTIR juga merupakan analisis yang berguna untuk mengetahui berbagai macam jenis polimer bahkan mampu mengidentifikasi semua molekul dan gugus fungsi yang ada pada polimer plastik (Veerasingam et al., 2021). Selain itu, FTIR juga dapat digunakan untuk mengetahui perubahan ikatan kimia pada mikroplastik akibat degradasi (Lin et al., 2020; Liu et al., 2021; Song et al., 2017; Zhu et al., 2020).

Seperti yang telah disebutkan, spektrum IR akan menunjukkan identitas komponen yang dianalisis. Polimer jenis PET dan PA menunjukkan puncak-puncak pada bilangan gelombang yang merepresentasikan ikatan-ikatan yang menyusun rantai panjang tersebut. Puncak-puncak tipikal jenis polimer PET dan PA menurut Veerasingam et al. (2021) ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2. 1 Karakteristik Puncak Spektrum IR Polimer PET

Bilangan Gelombang Puncak (cm^{-1})	Gugus Fungsi
1713	C=O <i>stretching</i>
1241	C–O <i>stretching</i>
1094	C–O <i>stretching</i>
720	<i>Aromatic CH out-of-plane bending</i>

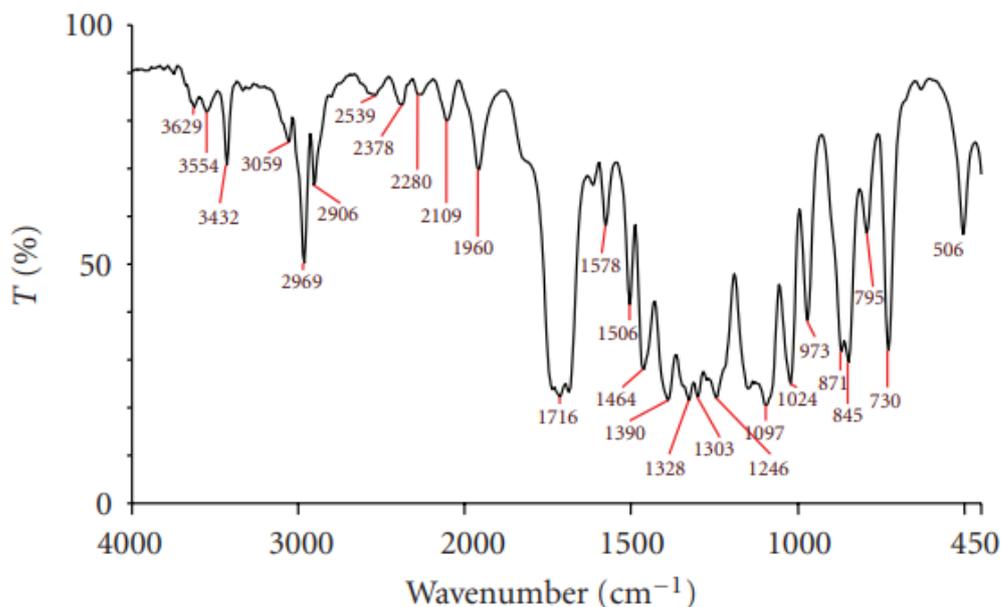
Sumber: Veerasingam et al. (2021)

Tabel 2. 2 Karakteristik Puncak Spektrum IR Polimer PA

Bilangan Gelombang Puncak (cm^{-1})	Gugus Fungsi
3298	N–H <i>stretching</i>
2932	CH <i>stretching</i>
2858	CH <i>stretching</i>

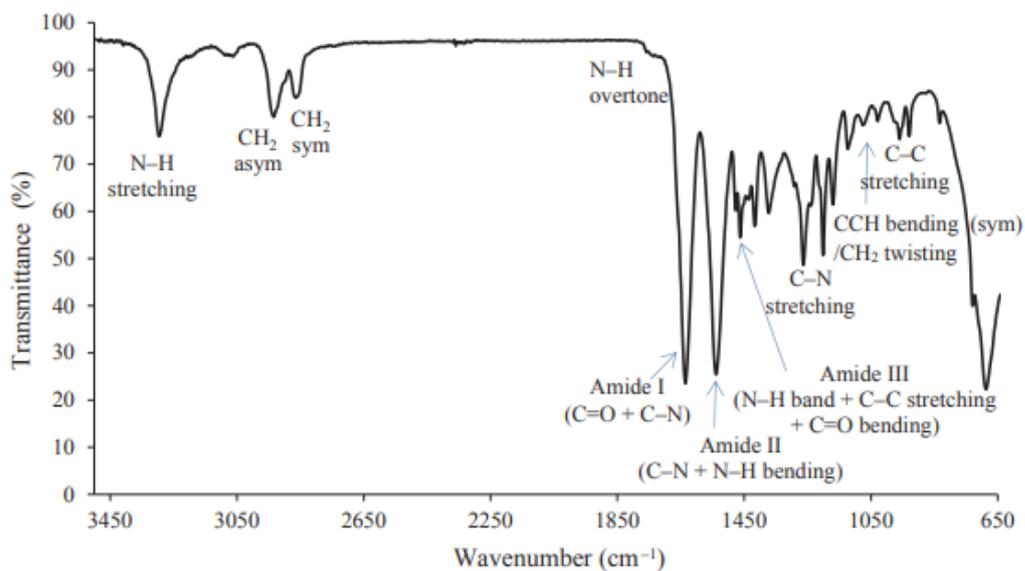
Bilangan Gelombang Puncak (cm^{-1})	Gugus Fungsi
1634	C=O stretching
1538	NH bending, C-N stretching
1464	CH ₂ bending
1199	CH ₂ bending

Sumber: Veerasingam et al. (2021)



Gambar 2. 3 Spektrum FTIR PET

Sumber: Prasad et al. (2011)



Gambar 2. 4 Spektrum FTIR PA

Sumber: Krylova & Dukštienė (2019)

2.7 Pengujian Hipotesis

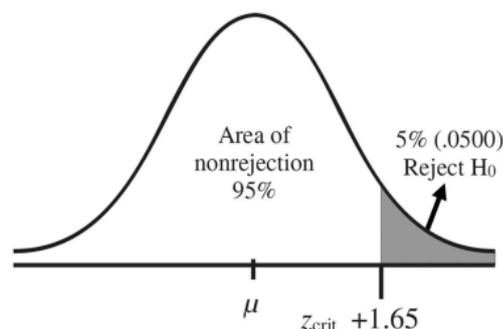
Menurut Willard (2020), pengujian hipotesis adalah prosedur yang digunakan dalam statistik untuk menentukan keputusan berdasarkan data sampel. Proses dari uji hipotesis dapat dibagi menjadi empat langkah dasar yaitu membuat hipotesis, menentukan nilai alpha (α) dan nilai kritis, menghitung statistik yang sesuai, dan membuat keputusan serta melaporkan hasilnya.

1. Pembuatan Hipotesis

Terdapat dua hipotesis yaitu di mana suatu parameter tidak memiliki efek terhadap respons dan sebaliknya. Kedua hipotesis itu adalah hipotesis nol dan hipotesis alternatif. Hipotesis nol (H_0) menunjukkan bahwa adanya perbedaan antara rata-rata sampel dan rata-rata populasi terjadi karena kebetulan atau *error*. Selain itu hipotesis nol juga dapat dituliskan sebagai kesetaraan yaitu tidak adanya perbedaan antara hasil statistik dengan parameter populasi. Hipotesis nol juga dapat menyatakan tidak adanya pengaruh variabel bebas yang berarti perlakuan yang tidak efektif. Sedangkan hipotesis alternatif (H_1) adalah kebalikan dari hipotesis nol. Hipotesis alternatif mendeskripsikan adanya perbedaan antara rata-rata sampel dan rata-rata populasi atau menunjukkan adanya pengaruh dari variabel bebas (Willard, 2020).

2. Penentuan Nilai Alpha dan Nilai Kritis

Nilai alpha (α) merupakan nilai probabilitas yang ditentukan oleh peneliti yang menunjukkan titik di mana H_0 harus ditolak. Nilai α juga menunjukkan di titik mana daerah kritis dimulai. Daerah kritis adalah daerah distribusi sampel di mana hasil memiliki probabilitas rendah untuk didapatkan. Karena α adalah nilai probabilitas, di saat nilainya sebesar 0,05 dan jika H_0 benar, kemungkinan didapatkan nilai sampel yang ada pada daerah kritis adalah 0,05 atau kurang. Nilai yang jatuh pada daerah ini rendah kemungkinannya untuk terjadi hanya karena kebetulan dan berarti menunjukkan penolakan H_0 . Daerah penolakan dan nonpenolakan dipisahkan oleh nilai kritis, yaitu nilai yang menunjukkan titik H_0 ditolak (Willard, 2020).



Gambar 2. 5 Distribusi Sampel $\alpha = 0,05$

Sumber: Willard (2020)

Daerah yang diarsir pada Gambar 2.5 merupakan daerah kritis yang menunjukkan penolakan H_0 . Rata-rata sampel yang jatuh pada daerah tersebut memiliki 5% atau kurang kemungkinan didapat secara kebetulan jika H_0 benar.

Kemungkinan yang rendah ini membuat H_0 cukup tidak masuk akal untuk bisa ditolak. Dalam penelitian eksperimen, hipotesis alternatif memperoleh hasil sangat jauh dari titik μ mengindikasikan efek dari variabel bebas (Willard, 2020).

3. Perhitungan Statistik

Uji *two-way* ANOVA dan Friedman digunakan untuk analisis statistik dalam penelitian ini. Uji *two-way* ANOVA adalah uji statistik yang digunakan untuk menganalisis ada tidaknya perbedaan antara rata-rata dua kelompok. Metode tersebut digunakan untuk menentukan bagaimana rata-rata suatu variabel kuantitatif berubah berdasarkan dua variabel bebas. Uji ini dilakukan saat peneliti ingin mengetahui apakah dua variabel bebas berpengaruh terhadap suatu variabel respons (Bevans, 2020). Uji Friedman merupakan metode versi nonparametric dari ANOVA. Metode tersebut diterapkan dengan data yang sudah diurutkan dan tidak perlu terdistribusi normal tetapi penerapan uji ini dilakukan dengan asumsi bahwa data yang ada tidak bergantung satu sama lain dan setiap kelompok memiliki variasi yang setara. Uji ini menilai perbedaan pada nilai median (Smalheiser, 2017). Hasil analisis statistik kemudian digunakan untuk membuat keputusan dan melaporkan hasil.

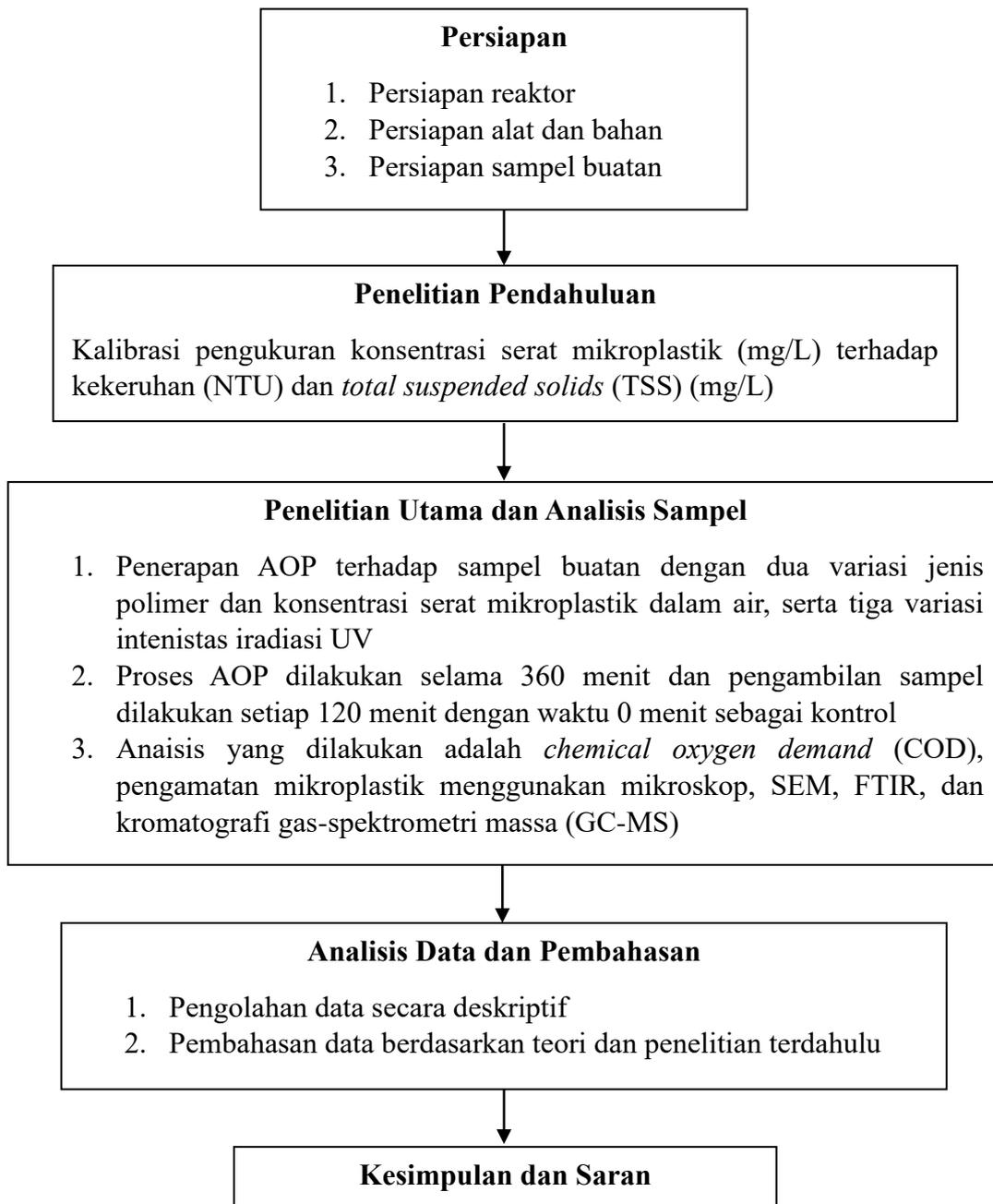
4. Pembuatan Keputusan dan Pelaporan Hasil

Penentuan keputusan dilakukan berdasarkan hasil analisis statistik yang menunjukkan apakah H_0 ditolak atau diterima. Kata signifikan sering digunakan dalam pelaporan hasil pengujian hipotesis. Kata signifikan berarti hasil yang didapat menunjukkan bahwa variabel bebas memiliki efek yang lebih besar terhadap variabel respons dibandingkan sekadar kebetulan. Format pelaporan hasil analisis umumnya berbunyi: Variabel bebas memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel respons (Willard, 2020).

BAB III METODOLOGI

3.1 Tahapan Penelitian

Kerangka penelitian dibuat sebagai gambaran umum tahap pelaksanaan penelitian dan memberikan informasi terkait apa saja yang dilakukan dalam penelitian agar penelitian dapat terarah dan menghasilkan kesimpulan. Kerangka penelitian dari penelitian tugas akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.1.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan meliputi persiapan reaktor, persiapan alat dan bahan, dan persiapan sampel buatan.

a. Persiapan reaktor

Reaktor yang disiapkan adalah terdiri dari *oxygen concentrator*, *ozone generator*, lampu UV-C, *magnetic stirrer*, gelas beaker sebagai wadah sampel air, dan kotak tempat di mana penyinaran UV dilakukan. Berikut spesifikasi alat-alat yang digunakan:

- *Oxygen concentrator* yang digunakan merupakan merek EverFlo yang diproduksi oleh Philips Respironics (Gambar 3.2). Alat ini bekerja dengan power 230 V/50 Hz, debit aliran gas berkisar 0,5-5 L/menit. Dengan kebutuhan power <300 W, alat ini mampu menghasilkan aliran oksigen dengan kemurnian mencapai 96%. Aliran oksigen ini akan menjadi *supply* ke *ozone generator* untuk memproduksi gaz ozon yang akan digunakan dalam eksperimen.



Gambar 3. 2 *Oxygen Concentrator*

Sumber: Philips

- *Ozone generator* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan merek Ozonic (Gambar 3.3). *Ozonic single module* standar terdiri dari dua *Ozonic ceramic tube* yang masing-masing dapat menghasilkan 10 gO₃/jam.



Gambar 3. 3 *Ozone Generator*

Sumber: PT Hexa Rekasarana

- Lampu UV yang digunakan adalah dengan merek Philips jenis TUV UVC dengan power 6 Watt dan panjang gelombang 254 nm.
- *Magnetic stirrer* yang digunakan adalah merek ThermoFisher jenis Cimarec+ Stirrer (Gambar 3.4) dengan kapasitas 4 L dan kecepatan pengadukan berkisar antara 50 hingga 1500 rpm.



Gambar 3. 4 *Magnetic Stirrer*

Sumber: *ThermoFisher*

b. Persiapan alat dan bahan

Alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan

No	Alat dan Bahan	Kegunaan
Pembuatan Sampel Buatan		
1	Benang <i>polyester</i> hitam	Bahan yang digunakan sebagai mikroplastik dalam sampel buatan
2	Benang <i>nylon</i> hitam	Bahan yang digunakan sebagai mikroplastik dalam sampel buatan
3	Gunting	Alat untuk memotong serat benang sepanjang 2-5 mm
4	Aquades	Media di mana serat benang didispersikan
5	<i>Magnetic stirrer</i>	Alat pengaduk untuk membantu agar pendispersian serat benang merata
Analisis Kekeruhan		
1	Turbidimeter	Alat untuk mengukur kekeruhan
2	Pipet ukur	Alat untuk membantu memindahkan air sampel dari wadahnya ke botol ukur
Analisis TSS		
1	Cawan porselen	Wadah hasil penyaringan, dapat digunakan dalam oven
2	Kertas saring	Media penyaring untuk memisahkan partikel

No	Alat dan Bahan	Kegunaan
3	<i>Vacuum pump</i>	Alat untuk membantu sampel air melewati media filter
4	Oven	Alat untuk mengeringkan hasil penyaringan
5	Desikator	Alat untuk menghilangkan sisa uap air yang ada dalam padatan sampel dan untuk mengembalikan temperatur ke suhu ruangan setelah proses pengeringan
6	Neraca analitik	Alat untuk mengukur massa hasil penyaringan dan pengeringan
Analisis COD		
1	Hach COD Digestion Vials 3-150 mg/L	Alat dan reagen untuk analisis COD rendah
2	Alat refluks	Alat untuk memanaskan sampel
Analisis Mikroplastik		
1	Membran filter fiberglass	Media penyaringan untuk memisahkan mikroplastik dari air. Membran filter yang digunakan berbahan dasar fiberglass agar tidak mengganggu analisis mikroplastik
2	<i>Vacuum pump</i>	Alat untuk membantu sampel air melewati media filter
3	Cawan petri	Wadah untuk menyimpan hasil penyaringan mikroplastik
4	Pinset	Alat untuk membantu pengamatan mikroplastik
5	<i>Dissecting microscope</i>	Alat untuk membantu pengamatan mikroplastik

c. Persiapan sampel buatan

Sampel buatan dibuat dari benang berbahan dasar *polyester* dan *nylon* yang dipotong-potong hingga dengan ukuran 2-5 mm kemudian didispersikan ke dalam aquades. Sebelum didispersikan, potongan serat benang dikeringkan terlebih dahulu menggunakan oven pada suhu 120° selama satu jam untuk menghilangkan kandungan air yang mungkin ada akibat lingkungan sekitar sehingga hasil penimbangan lebih akurat. Konsentrasi mikroplastik yang dibuat adalah berdasarkan massa mikroplastik per volume aquades. Variasi konsentrasi mikroplastik yang dibuat adalah 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; dan 0,5 mg/L. Sampel buatan dengan variasi konsentrasi tersebut digunakan untuk kalibrasi pengukuran konsentrasi mikroplastik terhadap kekeruhan dan TSS. Sedangkan sampel buatan yang disiapkan untuk penelitian utama dibuat sebesar 0,1 dan 0,5 mg/L, yaitu massa terkecil dan terbesar yang dapat didispersikan dengan baik dalam aquades.

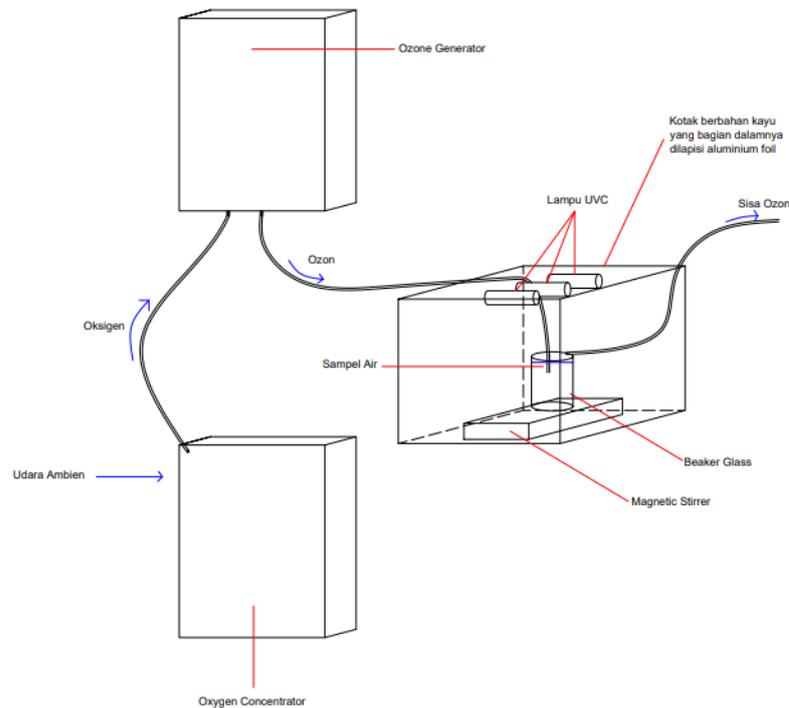
3.1.2 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan yang dilakukan adalah kalibrasi pengukuran kekeruhan (NTU) terhadap konsentrasi mikroplastik (mg/L) dan *total suspended solids* (TSS, mg/L) terhadap konsentrasi mikroplastik (mg/L). Analisis kekeruhan dan TSS dilakukan berdasarkan metode menurut APHA 2017. Kekeruhan dianalisis menggunakan Hanna Instrument ISO 7027 Compliant Benchtop Turbidity Meter HI88713-02 dan TSS menggunakan Oven Binder BD 115 dan Neraca Analitik OHAUS Pioneer PX224/e.

3.1.3 Penelitian Utama dan Analisis Sampel

a. Penelitian Utama

Penelitian utama terdiri dari pengolahan sampel buatan menggunakan AOP. Penerapan AOP digunakan untuk mengetahui kondisi optimum yang diperlukan untuk mendegradasi serat mikroplastik. Sampel buatan dengan konsentrasi mikroplastik yang telah ditetapkan akan diolah menggunakan AOP dengan tiga variasi intensitas penyinaran UV. Dari percobaan tersebut akan didapatkan kondisi operasional optimum berdasarkan intensitas penyinaran UV. Sketsa reaktor yang akan digunakan dalam penelitian utama ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Rangkaian Reaktor AOP

- Reaktor yang digunakan berupa reaktor sistem *batch* dengan kapasitas 1 L. Sampel buatan yang akan diolah berupa air yang mengandung serat mikroplastik dengan konsentrasi 0,1 dan 0,5 mg/L yang terbuat dari benang *polyester* dan *nylon* hitam yang didispersikan ke dalam aquades.
- Udara ambien digunakan sebagai sumber oksigen oleh *oxygen concentrator* yang kemudian akan dikonversi menjadi ozon oleh *ozone generator*. Ozon didispersikan ke dalam sampel air melalui selang. Dalam penelitian ini digunakan dosis ozon

yang konstan yaitu 2 L/menit. Konsentrasi ozon dalam gas yang dialirkan diukur menggunakan *ozone detector* (Gambar 3.6).



Gambar 3. 6 *Ozone Detector*

Sumber: Bosean

- Penyinaran UV dilakukan menggunakan 3 buah lampu UVC 6 Watt yang dipasang di bagian langit-langit reaktor. Dilakukan variasi penyinaran menggunakan 1, 2, dan 3 lampu. Intensitas sinar UV masing-masing variasi diukur menggunakan UVC Light Meter (Gambar 3.7). Pengukuran intensitas iradiasi UV dilakukan sebelum digunakannya reaktor. Intensitas diukur dengan jarak dari sumber iradiasi sebesar ± 34 cm, yaitu pada dasar wadah sampel. Satu lampu UV menghasilkan intensitas sebesar $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, dua lampu sebesar $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, dan tiga lampu sebesar $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.



Gambar 3. 7 *UVC Light Meter*

Sumber: Sanpometer

- Reaktor dioperasikan selama 360 menit dan dilakukan pengambilan sampel pada waktu ke 0, 120, 240, dan 360 menit.

Matriks variasi percobaan ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Matriks Variasi Percobaan

Konsentrasi MP (A)	UV (B)		
	30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
0,5 mg/L	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃
0,1 mg/L	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃
AB	Jenis Polimer (C)		
	PET	PA	
A ₁ B ₁	A ₁ B ₁ C ₁	A ₁ B ₁ C ₂	
A ₁ B ₂	A ₁ B ₂ C ₁	A ₁ B ₂ C ₂	
A ₁ B ₃	A ₁ B ₃ C ₁	A ₁ B ₃ C ₂	
A ₂ B ₁	A ₂ B ₁ C ₁	A ₂ B ₁ C ₂	
A ₂ B ₂	A ₂ B ₂ C ₁	A ₂ B ₂ C ₂	
A ₂ B ₃	A ₂ B ₃ C ₁	A ₂ B ₃ C ₂	

b. Analisis Sampel

Parameter yang akan diukur adalah COD (mg/L) dan analisis visual menggunakan mikroskop dan SEM, FTIR, dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Analisis COD akan dilakukan sesuai metode standar menurut APHA (2017). Analisis COD dan visual menggunakan mikroskop dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air, Departemen Teknik Lingkungan, ITS; sedangkan analisis SEM dilakukan di Departemen Teknik Material Matelurgi, ITS.

- Analisis COD

Metode analisis COD yang digunakan adalah *closed reflux colorimetric*. Prosedurnya terdiri dari pembuatan larutan kerja, pengawetan sampel, proses *digestion*, pengukuran reduksi dikromat, dan persiapan kurva kalibrasi.

1. Pembuatan larutan kerja

Dibuat larutan induk dengan melarutkan 850 mg KHP ke dalam 1 L aquades (COD = 1000 mgO₂/L). Dari larutan induk tersebut kemudian dibuat deret larutan kerja dengan kadar COD sebesar 10, 30, 50, 70, dan 90 mgO₂/L.

2. Pengawetan sampel

Pengujian sampel dilakukan 2 hari sekali sehingga butuh dilakukan pengawetan sampel. Sampel diawetkan dengan menambahkan H₂SO₄ pekat dan disimpan dalam pendingin.

3. Proses *digestion*

Pada penelitian ini digunakan reagen siap pakai yang terdiri dari *digestion solution* sebanyak 1,5 mL dan larutan pereaksi asam sulfat sebanyak 3,5 mL. Dimasukkan larutan kerja atau sampel uji sebanyak 2,5 mL ke dalam tabung vial kemudian ditutup dan dikocok hingga homogen. Selanjutnya tabung vial dimasukkan ke dalam alat refluks yang telah dipanaskan pada suhu 150° dan dilakukan refluks selama 2 jam.

4. Persiapan kurva kalibrasi

Dihidupkan spektrofotometer dan didiamkan selama 10 menit agar stabil. Panjang gelombang diatur pada 420 nm sesuai dengan variasi konsentrasi COD yang akan diukur. Diukur absorbansi seluruh larutan kerja kemudian dicatat hasilnya dan diplotkan terhadap kadar COD. Dari hasil plot akan didapatkan persamaan garis lurus yang akan digunakan untuk menghitung COD dari sampel uji.

5. Pengukuran reduksi dikromat

Sampel yang telah direfluks didinginkan hingga suhu ruangan. Kemudian diukur serapan sampel menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 420 nm. Kemudian dihitung kadar COD berdasarkan persamaan garis lurus yang sudah didapatkan sebelumnya.

- Analisis mikroplastik

Analisis mikroplastik dilakukan untuk mengetahui ukuran dari serat mikroplastik yang ada dalam sampel buatan. Analisis mikroplastik dilakukan berdasarkan modifikasi dari metode analisis menurut *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Lestari et al., 2020). Analisis mikroplastik dalam sampel buatan terdiri dari proses penyaringan dan pengamatan. Prosedur penyaringan mikroplastik adalah sebagai berikut:

1. Filter membran *fiberglass* diletakkan pada perangkat penyaringan vakum yang tersambung ke pompa vakum.
2. Sampel air disaring melalui filter tersebut.
3. Filter kemudian disimpan dalam cawan petri tertutup dan dibiarkan kering pada suhu ruangan.



Gambar 3. 8 Perangkat Penyaringan Vakum

Setelah itu dapat dilakukan pengamatan mikroplastik untuk menentukan ukurannya. Prosedur pengamatan adalah sebagai berikut:

1. Disiapkan filter hasil penyaringan mikroplastik yang telah dilakukan.
2. Disiapkan kaca preparat yang dilengkapi dengan mikrometer.
3. Filter diamati menggunakan *dissecting microscope* dengan perbesaran 40x. Mikroplastik dipindahkan menggunakan pinset kemudian diukur menggunakan mikrometer yang ada pada kaca preparat.



Gambar 3. 9 Pengamatan Mikroplastik di Bawah Mikroskop

- Analisis SEM

Analisis SEM dilakukan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, ITS. Alat SEM yang digunakan adalah FEI InspectS50 (Gambar 3.10). Alat tersebut merupakan alat SEM *Low Vacuum* dengan resolusi tinggi yang cocok digunakan untuk sampel non-konduktor dan dapat menghasilkan gambar dengan perbesaran mencapai 1.000.000x. Proses analisis menggunakan SEM menurut Abdullah & Mohammed (2019) adalah sebagai berikut:

1. Analisis dilakukan dengan menerapkan sinar elektron dengan energi antara 100-3.000 volt elektron. Sumber panas biasa digunakan untuk menghasilkan elektron.
2. Ukuran titik yang dihasilkan oleh penembak sinar terlalu besar untuk menghasilkan gambar yang tajam sehingga SEM dilengkapi dengan lensa-lensa untuk mengecilkan titik tersebut dan memfokuskan elektron ke spesimen yang akan diamati. Ukuran titik di sebagian besar SEM adalah lebih kecil dari 10 nm. Elektron yang dikumpulkan dari lensa terakhir mengalami kontak dengan spesimen dan selanjutnya berpenetrasi sedalam 1 μm untuk menghasilkan sinyal yang digunakan untuk membentuk gambar.
3. Gambar dari spesimen terbentuk secara berkala mengikuti gerakan pemindai yang menyebabkan perpindahan sinar elektron ke beberapa lokasi yang membentuk garis lurus hingga memproduksi raster di permukaan spesimen. Proses ini dipengaruhi oleh perbesaran yang diinginkan.
4. Elektron detektor berfungsi untuk mendeteksi sinyal yang dihasilkan dari pemindaian sampel.
5. Sinyal tersebut kemudian ditunjukkan pada layar dan operator akan mengatur kecerahan serta intensitasnya hingga dihasilkan gambar yang jelas. Untuk mendapatkan gambar yang menunjukkan detail kecil digunakan perbesaran di atas 10.000x.
6. Voltase elektron yang ditembakkan berpengaruh terhadap detail yang dihasilkan. Gambar akan menunjukkan banyak informasi permukaan jika

akselerasi voltase yang digunakan lebih rendah dari 5 kV. Sedangkan, untuk akselerasi voltase antara 15-30 kV, yang dapat berpenetrasi ke bawah permukaan, akan menghasilkan sinyal yang membawa detail tentang interior sampel.

7. Gambar tiga dimensi yang dihasilkan SEM bergantung pada visualisasi topografi sampel mengenai bentuk, ukuran, dan tekstur permukaannya.



Gambar 3. 10 Alat SEM

Sumber: FEI Company

- Analisis FTIR

Analisis FTIR dilakukan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Alat FTIR yang digunakan adalah jenis *attenuated total reflection* dengan merek ThermoFisher Scientific Nicolet iS10 FTIR Spectrofotometer (Gambar 3.11). ATR-FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi mikroplastik dan untuk menentukan perbandingan absorpsi gugus karbonil (C=O) dengan absorpsi gugus metil (CH₂) yang disebut sebagai *carbonyl index* (CI) (Zhu et al., 2020). CI dapat digunakan untuk melihat seberapa besar oksidasi permukaan yang terjadi pada mikroplastik (Song et al., 2017). Menurut Almond et al. (2020), CI dihitung dengan membandingkan nilai absorpsi puncak pada kisaran bilangan gelombang 1.850-1.650 cm⁻¹ dan pada kisaran bilangan gelombang 1.500-1.420 cm⁻¹ atau dapat dituliskan sebagai persamaan berikut:

$$\text{Carbonyl index (CI)} = \frac{\text{Absorbansi puncak } 1.850-1.650 \text{ cm}^{-1}}{\text{Absorbansi puncak } 1.500-1.420 \text{ cm}^{-1}} \quad (3.1)$$



Gambar 3. 11 Alat ATR-FTIR

Sumber: ThermoFisher

- Analisis Kromatografi Gas-Spektrometri Massa (GC-MS)
Kromatografi gas (GC) merupakan metode analisis dalam menganalisis bahan kimia organik dalam campuran kompleks dengan memisahkan senyawa yang mudah menguap. Sedangkan spektrometri massa (MS) merupakan metode deteksi yang dapat memberikan informasi tentang penentuan senyawa dalam suatu sampel berdasarkan berat molekulnya. Penggabungan kedua metode tersebut dapat digunakan untuk mengetahui senyawa organik yang terkandung dalam suatu sampel dengan GC sebagai pemisah dan MS sebagai detektor (Hübschmann, 2015). Analisis GC-MS dilakukan di Unit Layanan Pengujian Fakultas Farmasi Universitas Airlangga. Alat GC yang digunakan adalah Agilent 6890N Network GC System dan MS menggunakan Agilent 5973 inert MSD (Gambar 3.12).



Gambar 3. 12 Alat GC-MS

Sumber: Agilent

3.1.4 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dan pembahasan terdiri dari pengolahan data secara deskriptif dan pembahasan data berdasarkan teori serta penelitian terdahulu. Efektivitas proses AOP berbasis O_3/UV dalam mendegradasi dan memineralisasi mikroplastik dilihat dari perubahan COD dalam air dan hasil pengamatan visual menggunakan mikroskop dan SEM. Selanjutnya kondisi optimum operasi AOP ditentukan dengan melihat pengaruh variabel bebas terhadap besar degradasi yang terjadi pada serat mikroplastik dengan melakukan analisis statistik. Untuk mengetahui pengaruh intensitas iradiasi UV dan waktu kontak digunakan metode *two-way* ANOVA dan model grafik menggunakan fitur Optimal Custom Design dalam aplikasi Design-Expert. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh jenis polimer dan konsentrasi serat mikroplastik digunakan metode Friedman.

Hipotesis yang digunakan dalam pengolahan data dengan intensitas iradiasi UV dan waktu kontak sebagai faktor dan rasio COD_t/COD_0 sebagai respons adalah sebagai berikut:

- H₀: Tidak ada perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi intensitas iradiasi UV
- H₁: Terdapat perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi intensitas iradiasi UV
- H₀: Tidak ada perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi waktu kontak
- H₁: Terdapat perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi intensitas iradiasi UV

Nilai signifikansi (α) yang digunakan adalah 0,05. Jika nilai p yang dihasilkan $>0,05$ maka H₀ diterima. Kelompok data yang diujikan adalah variasi percobaan menggunakan 0,1 mg/L PET, 0,5 mg/L PET, 0,1 mg/L PA, dan 0,5 mg/L PA.

Sedangkan hipotesis yang digunakan dalam pengolahan data dengan jenis polimer atau konsentrasi serat mikroplastik sebagai faktor dan rasio COD_t/COD_0 sebagai data respons adalah sebagai berikut:

- H₀: Tidak ada perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi jenis polimer
- H₁: Terdapat perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi jenis polimer
- H₀: Tidak ada perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi konsentrasi serat mikroplastik
- H₁: Terdapat perbedaan perubahan rasio COD_t/COD_0 berdasarkan variasi konsentrasi serat mikroplastik

Nilai signifikansi yang digunakan sama dengan uji statistik sebelumnya. Kelompok data yang diujikan untuk mengetahui pengaruh jenis polimer adalah variasi percobaan 0,1 dan 0,5 mg/L serat mikroplastik dengan intensitas iradiasi UV sebesar 30, 169, dan 189 $\mu W/cm^2$. Sedangkan kelompok data yang diujikan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi serat mikroplastik adalah variasi percobaan menggunakan jenis polimer PET dan PA dengan intensitas iradiasi UV dengan jenjang yang sama.

3.1.5 Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pengolahan data dari pengolahan air sampel buatan dihasilkan kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian yaitu terkait kondisi optimum pengoperasian AOP untuk pengolahan serat mikroplastik. Saran diperlukan untuk mengembangkan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengukuran Kelimpahan Serat Mikroplastik sebagai Parameter Fisik Kualitas Air

Hubungan antara kelimpahan mikroplastik dengan parameter kualitas air merupakan pendekatan yang penting untuk mengetahui sumber dan keberadaan mikroplastik dalam air (Sarkar et al., 2021). Selain itu, dengan diketahuinya hubungan antara kelimpahan mikroplastik dengan parameter kualitas air diharapkan dapat memudahkan identifikasi mikroplastik dalam air. Menurut Sarkar et al. (2021), kelimpahan mikroplastik dalam air berhubungan erat dengan kekeruhannya di mana semakin besar kelimpahan mikroplastik, semakin besar pula kekeruhan dalam air dan begitu sebaliknya. Dalam penelitian ini dianalisis hubungan antara kelimpahan serat mikroplastik dengan parameter fisik kualitas air yaitu kekeruhan dan *total suspended solids* (TSS). Analisis kekeruhan dilakukan pada sampel buatan dengan konsentrasi serat mikroplastik jenis *nylon* (PA) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; dan 0,5 mg/L. Pengukuran kekeruhan dilakukan secara rangkap dan dibandingkan dengan air suling sebagai blanko. Hasil pengukuran kekeruhan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran Kekeruhan

No	Konsentrasi (mg/L)	Kelimpahan MP jenis PA (partikel/L)	Kekeruhan (NTU)
1	0,1	45	Blanko: 0,32 Sampel 1: 0,28 Sampel 2: 0,30
2	0,2	108	Blanko: 0,40 Sampel 1: 0,30 Sampel 2: 0,30
3	0,3	125	Blanko: 0,25 Sampel 1: 0,40 Sampel 2: 0,25
4	0,4	146	Blanko: 0,25 Sampel 1: 0,40 Sampel 2: 0,25
5	0,5	237	Blanko: 0,20 Sampel 1: 0,25 Sampel 2: 0,45

Dari beberapa hasil pengukuran, didapat nilai kekeruhan sampel yang lebih rendah dari blanko seperti pada pembacaan sampel 0,1 dan 0,2 mg/L serat mikroplastik. Ada pula sampel dengan konsentrasi lebih tinggi memiliki nilai kekeruhan yang justru lebih rendah seperti pada sampel 0,5 mg/L serat mikroplastik.

Selain kekeruhan, hubungan kelimpahan serat mikroplastik dengan TSS juga dianalisis. Analisis TSS dilakukan terhadap sampel buatan dengan kelimpahan 35 partikel/L

serat mikroplastik jenis PA. Hasil penimbangan untuk menentukan TSS dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran TSS

No	Kelimpahan MP (partikel/L)	Volume sampel (L)	Cawan + kertas saring (gr)	Pengeringan terakhir (gr)	TSS (mg/L)
1	35	1	49,9725	49,9725	0
2	35	1	41,6770	41,6755	(-)
3	35	1	49,9369	49,9345	(-)
4	35	3	49,9367	49,9344	(-)

Dapat dilihat dari hasil yang didapat bahwa kelimpahan mikroplastik tidak terbaca sebagai TSS walau dengan menggunakan volume sampel yang lebih banyak. Hasil yang menunjukkan tidak terdeteksinya kelimpahan serat mikroplastik sebagai TSS maupun kekeruhan ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Buwono et al. (2021) yang menyatakan bahwa parameter kualitas fisik air di mana terdapat kelimpahan mikroplastik berbentuk serat masih memenuhi ketentuan dan tidak terpengaruh oleh tingkat kelimpahannya. Dengan hasil ini, maka kekeruhan dan TSS tidak akan digunakan sebagai parameter untuk mengindikasikan terjadinya degradasi serat mikroplastik.

4.2 Degradasi Serat Mikroplastik oleh AOP O₃/UV

Degradasi serat mikroplastik dalam penelitian ini ditunjukkan oleh COD, analisis visual menggunakan mikroskop dan SEM, FTIR, serta GC-MS. Dari percobaan yang dilakukan terhadap serat PET yang awalnya berukuran 2-3 mm dan serat PA yang awalnya berukuran ±5 mm, didapat hasil yang berbeda-beda setelah penerapan AOP dengan variasi intensitas sinar UV.

4.2.1 Perubahan COD dalam Air

Pada data yang ada di Lampiran B, dapat dilihat bahwa tidak ada pola peningkatan atau penurunan COD yang identik satu sama lainnya, sehingga data COD dibuat menjadi rasio agar memudahkan identifikasi seberapa besar degradasi yang terjadi. Grafik yang menunjukkan data rasio COD_t/COD₀ terhadap waktu kontak terdapat pada Gambar 4.1.

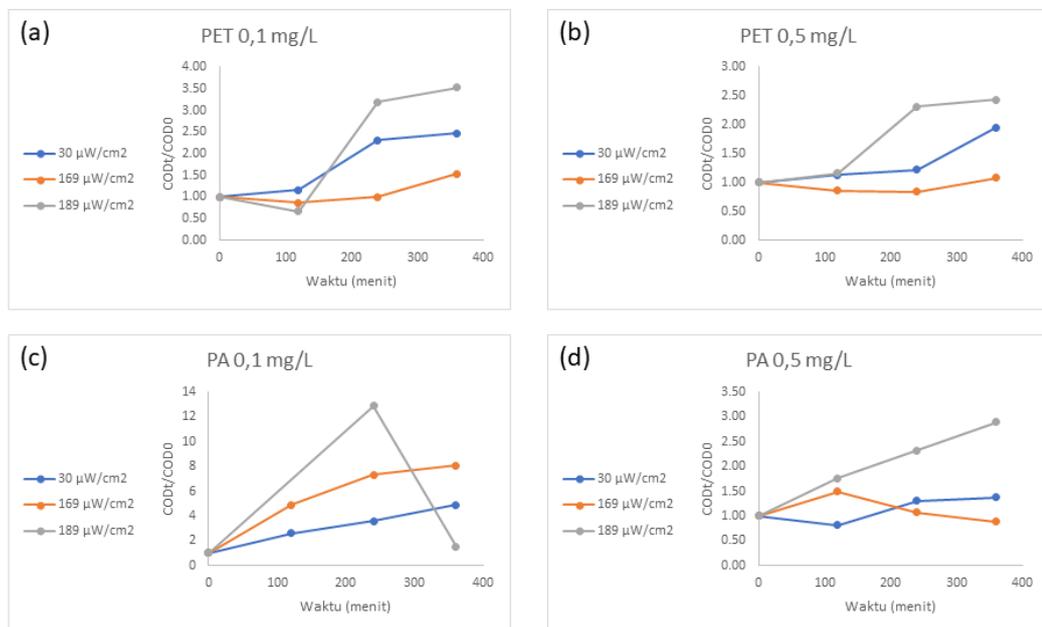
Perubahan rasio COD_t/COD₀ untuk variasi 0,1 mg/L PET ditunjukkan pada Gambar 4.1 (a). Setelah 120 menit waktu kontak, penggunaan 30 μW/cm² menyebabkan peningkatan rasio menjadi 1,16, sedangkan penggunaan 169 dan 189 μW/cm² menyebabkan penurunan rasio menjadi 0,86 dan 0,67. Setelah 240 menit, ketiga penggunaan intensitas iradiasi menyebabkan peningkatan rasio menjadi 2,31 untuk 30 μW/cm², 1 untuk 169 μW/cm², dan 3,20 untuk 189 μW/cm². Peningkatan rasio terus terjadi setelah 360 menit waktu kontak pada penggunaan 30, 160, dan 189 μW/cm² yaitu menjadi 2,47; 1,54; dan 3,53.

Grafik rasio COD_t/COD₀ terhadap waktu kontak untuk variasi 0,5 mg/L PET ditunjukkan pada Gambar 4.1 (b). Setelah 120 menit waktu kontak, penggunaan 30 dan 189 μW/cm² menyebabkan peningkatan rasio menjadi 1,14 dan 1,16, sedangkan penggunaan 169 μW/cm² menyebabkan penurunan menjadi 0,87. Setelah 240 menit, penggunaan 169 μW/cm²

kembali berkurang menjadi 0,84, sedangkan penggunaan 30 dan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ meningkat kembali menjadi 1,23 dan 2,31. Setelah 360 menit waktu kontak, ketiga variasi intensitas iradiasi menyebabkan peningkatan rasio yaitu menjadi 1,95 untuk 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 1,08 untuk 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, dan 2,43 untuk 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Perubahan rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ pada sampel yang mengandung 0,1 mg/L serat PA ditunjukkan pada Gambar 4.1 (c). Setelah 120 menit waktu kontak, penerapan ketiga variasi intensitas iradiasi UV menyebabkan peningkatan rasio, begitu pula setelah 240 menit waktu kontak. Penggunaan 30, 169 dan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ menimbulkan peningkatan rasio menjadi 3,60; 7,34; dan 12,8. Setelah 360 menit waktu kontak, penggunaan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ mengalami penurunan menjadi 1,55; sedangkan penggunaan 30 dan 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ terus mengalami peningkatan menjadi 4,89 dan 4,07.

Grafik rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ terhadap waktu untuk sampel yang mengandung 0,5 mg/L serat PA ditunjukkan pada Gambar 4.1 (d). Setelah 120 menit waktu kontak, penggunaan 169 dan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ menyebabkan peningkatan rasio menjadi 1,50 dan 1,76; sedangkan penggunaan 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ menyebabkan penurunan rasio menjadi 0,81. Setelah 240 menit, penerapan 30 dan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ menyebabkan peningkatan rasio menjadi 1,31 dan 2,33; sedangkan penerapan 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ menyebabkan penurunan menjadi 1,07. Peningkatan rasio terus terjadi setelah 360 menit waktu kontak pada penggunaan 30 dan 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ yaitu menjadi 1,37 dan 2,90; sedangkan penerapan 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ menimbulkan penurunan menjadi 0,88.



Gambar 4. 1 Grafik Rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ terhadap Waktu

Terdapat 3 macam pola perubahan yaitu COD mengalami peningkatan kemudian penurunan, COD mengalami penurunan kemudian peningkatan, dan COD terus mengalami peningkatan. Peningkatan COD terjadi akibat meningkatnya kandungan organik dalam air yang berasal dari aditif plastik maupun bagian dari plastik itu sendiri yang luruh selama degradasi mikroplastik oleh hidrosil radikal yang dihasilkan sistem AOP (Lee et al., 2020;

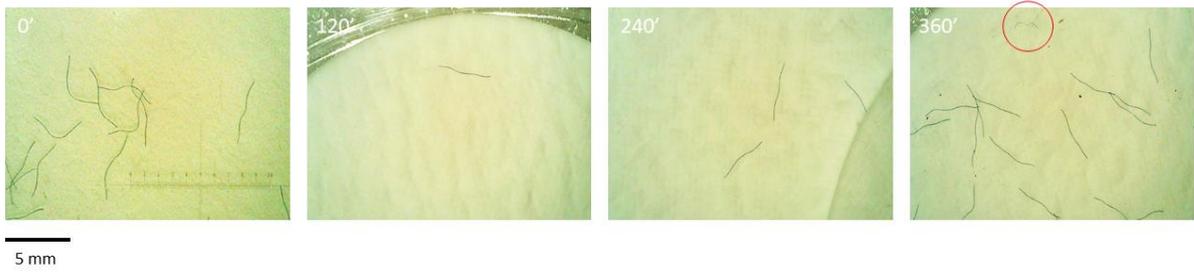
Suhrhoff & Scholz-Böttcher, 2016). Sedangkan penurunan COD terjadi akibat degradasi lebih jauh yang terjadi pada organik terlarut tersebut menjadi bahan yang tidak teranalisis (Nabi et al., 2020). Perbedaan COD di awal mungkin terjadi akibat perbedaan waktu pembuatan sampel buatan dan terjadi oksidasi saat penyimpanan. Menurut Lin et al. (2020), dosis iradiasi UV yang lebih tinggi akan menimbulkan degradasi yang lebih besar. Tetapi penggunaan intensitas iradiasi sebesar $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pada variasi 0,1 mg/L PET, 0,5 mg/L PET, dan 0,5 mg/L PA menunjukkan grafik peningkatan rasio yang lebih rendah dari penggunaan intensitas $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Selain itu, pada variasi 0,1 mg/L PA peningkatan rasio terjadi sangat tinggi setelah waktu kontak 240 menit dan menurun drastis setelah 360 menit. Hal tersebut mungkin terjadi akibat degradasi mikroplastik dan degradasi organik terlarut yang berlangsung bersamaan. Hal yang sama juga dijelaskan oleh Suhrhoff & Scholz-Böttcher (2016), yaitu organik yang dihasilkan oksidasi serat mikroplastik banyak yang bersifat sensitif terhadap iradiasi UV sehingga setelah terlepas dalam air dapat langsung teruraikan. Potensi efisiensi oksidasi serat mikroplastik oleh AOP mungkin terimbangi oleh degradasi organik terlarut sebelum pengambilan sampel.

4.2.2 Perubahan Morfologi Serat Mikroplastik

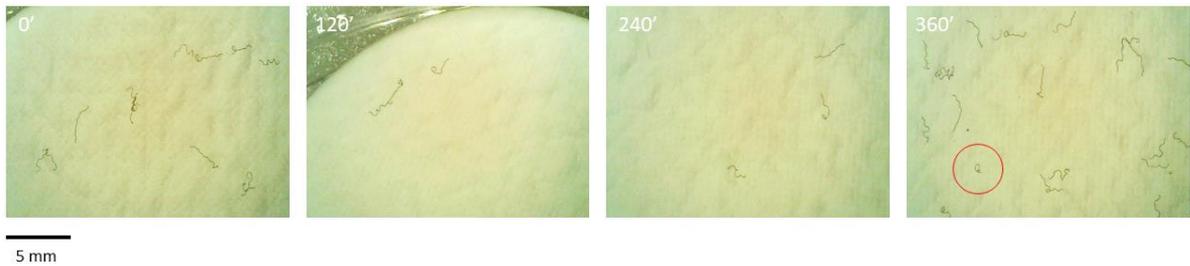
Telah diamati perubahan mikroplastik di bawah mikroskop. Dari seluruh hasil yang didapat, tidak terlihat adanya perubahan yang signifikan terkait ukuran terutama dari waktu 0 hingga 240 menit. Tetapi terlihat beberapa serat mikroplastik yang menjadi lebih kecil dan tipis di waktu 360 menit seperti pada Gambar 4.3 hingga Gambar 4.13. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Lambert & Wagner (2016), hal tersebut menandakan bahwa degradasi yang terjadi dimulai dari oksidasi permukaan dan selanjutnya kemungkinan terbentuknya mikroplastik yang lebih kecil.



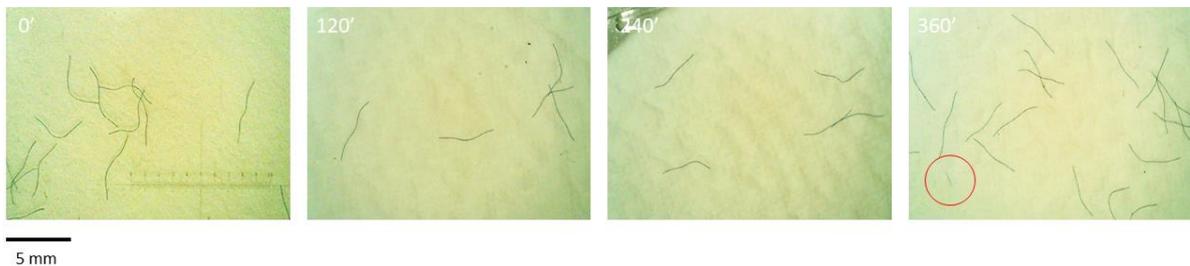
Gambar 4. 2 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



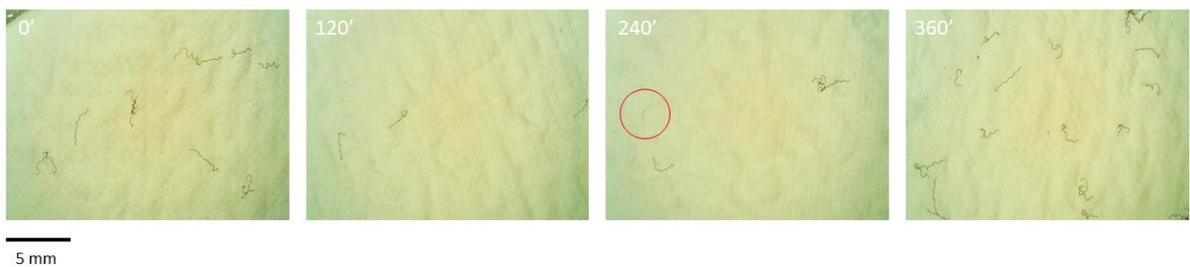
Gambar 4. 3 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



Gambar 4. 4 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



Gambar 4. 5 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

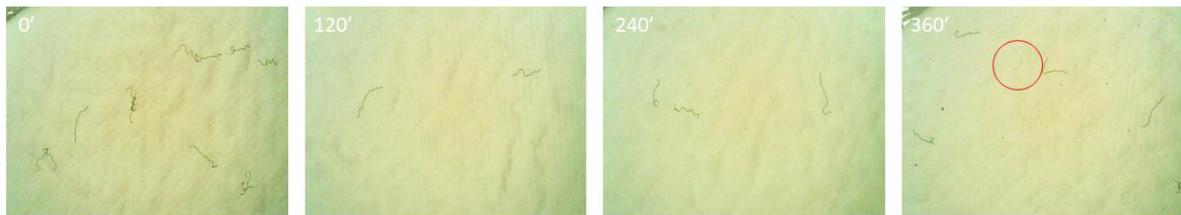


Gambar 4. 6 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



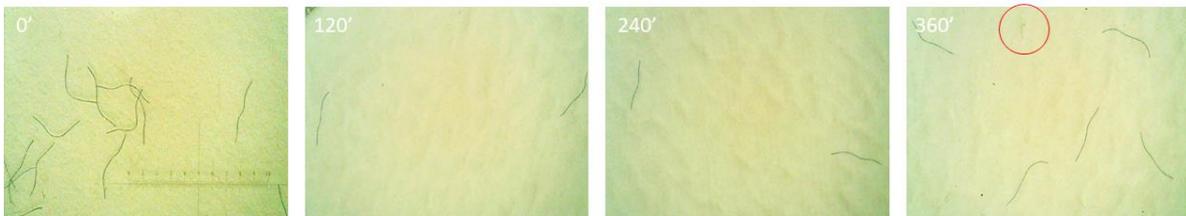
5 mm

Gambar 4. 7 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



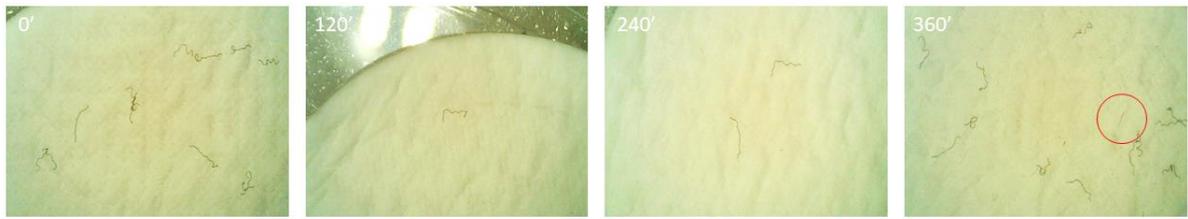
5 mm

Gambar 4. 8 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



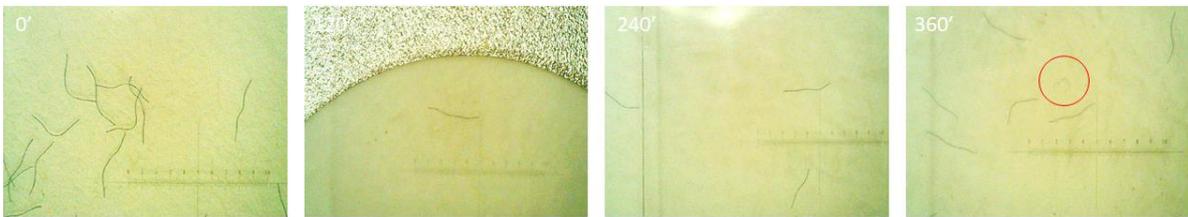
5 mm

Gambar 4. 9 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



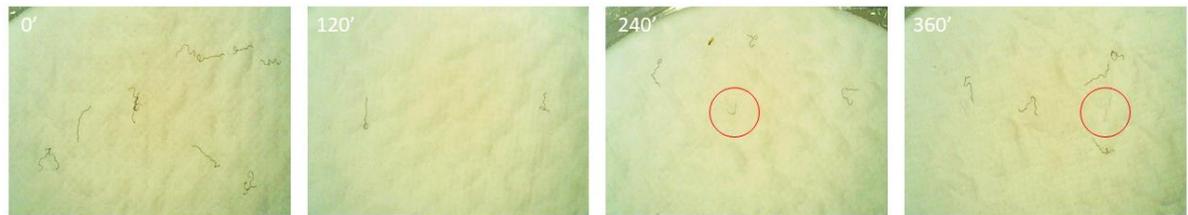
5 mm

Gambar 4. 10 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



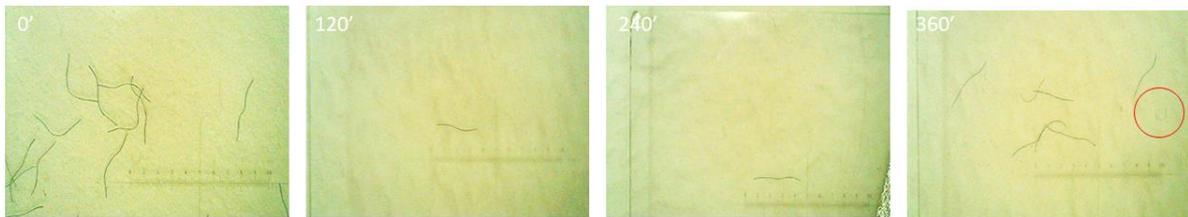
5 mm

Gambar 4. 11 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



5 mm

Gambar 4. 12 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



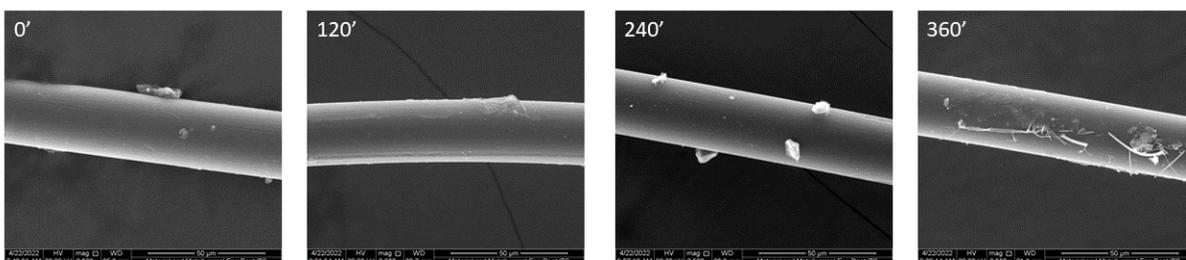
5 mm

Gambar 4. 13 Hasil Pengamatan Mikroskop 0,5 mg/L PA dengan Intenistas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

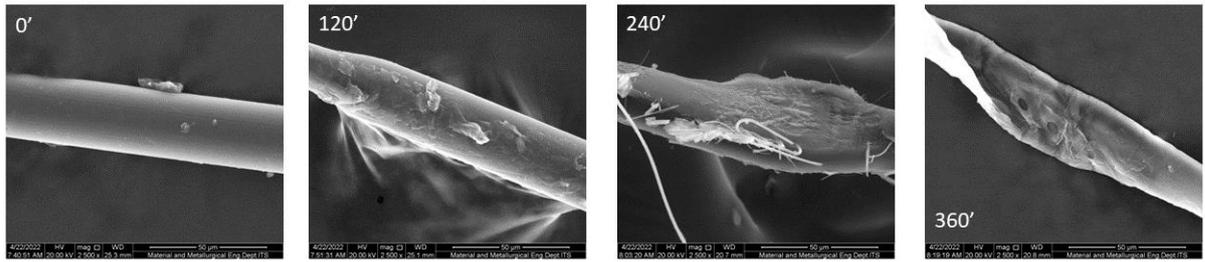
Oksidasi permukaan yang terjadi akibat proses AOP ditandai dengan terbentuknya retakan, kerutan, dan merapuhnya permukaan mikroplastik (Kim et al., 2022). Untuk melihat

lebih jauh perubahan fisik serat mikroplastik akibat oksidasi permukaan, telah dilakukan analisis SEM. Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa permukaan serat mikroplastik jenis PA semakin rusak seiring dengan lama waktu kontak. Terlihat setelah kontak selama 120 menit, permukaan serat mikroplastik seperti mengelupas. Setelah 240 dan 360 menit, serat mikroplastik semakin menipis dan menyerupai kepingan. Hasil yang sama juga didapat oleh Zhu et al. (2020) yang menerapkan fotolisis sinar matahari buatan pada butiran mikroplastik jenis PS yang setelah 60 hari paparan terbentuk retakan di permukaannya dan menjadi lebih tipis. Namun pada Gambar 4.14 terlihat tidak ada kerusakan permukaan yang signifikan pada permukaan serat mikroplastik. Hal tersebut dapat terjadi akibat lebih rendahnya intensitas UV yang disediakan sehingga radikal hidroksil yang dihasilkan tidak sebanyak paparan intensitas iradiasi yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Lin et al. (2020) yang menunjukkan hasil bahwa dosis iradiasi yang lebih tinggi akan menyebabkan kerusakan signifikan pada permukaan mikroplastik. Walaupun tidak mengalami banyak perubahan morfologi pada permukaannya, terlihat ada butiran-butiran dan juga serat-serat kecil yang menempel pada permukaannya. Partikel tersebut mungkin merupakan kumpulan fragmentasi serat mikroplastik akibat degradasi (Liu et al., 2021).

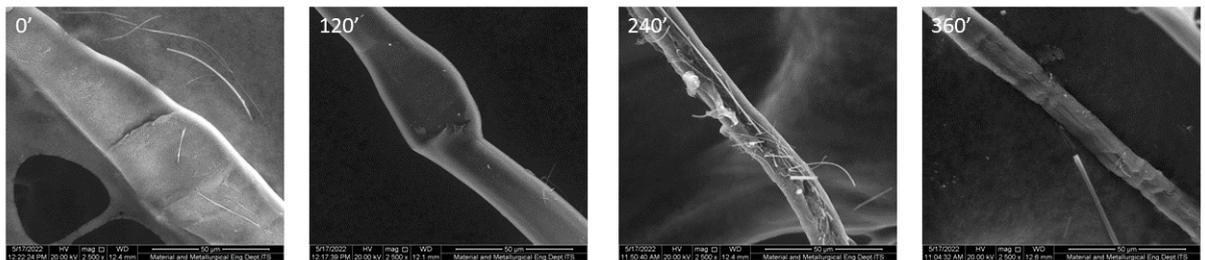
Perubahan morfologi serat mikroplastik jenis PET dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.15. Pada penggunaan intensitas iradiasi $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ setelah 240 menit waktu kontak, terlihat kerusakan permukaan yang signifikan di mana terdapat retakan yang cukup dalam dan kumpulan partikel-partikel kecil seperti pada variasi sebelumnya. Kemudian setelah 360 menit waktu kontak, terbentuk kerutan dan serat mikroplastik terlihat lebih tipis. Sedangkan pada penggunaan intensitas iradiasi sebesar $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, setelah 120 menit waktu kontak serat mikroplastik sudah terlihat menipis. Namun setelah 240 menit waktu kontak, serat mikroplastik justru terlihat halus dan hanya sedikit berkerut. Hal ini mungkin terjadi karena tidak meratanya oksidasi yang terjadi akibat paparan sinar UV yang juga kurang merata karena sinar UV dapat terpantul, terbaur, dan berbelok saat melewati media cair (Cai et al., 2018). Kemudian setelah 360 menit, serat mikroplastik semakin tipis dan retakan yang terbentuk terlihat dalam. Selanjutnya dilakukan juga pengamatan SEM terhadap hasil operasi AOP pada konsentrasi serat mikroplastik yang lebih besar yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19. Sama dengan hasil pengamatan pada operasi AOP dengan konsentrasi serat mikroplastik yang lebih rendah, setelah 120 menit waktu kontak, kedua jenis serat mikroplastik sudah mengalami kerusakan permukaan seperti retakan dan kerutan.



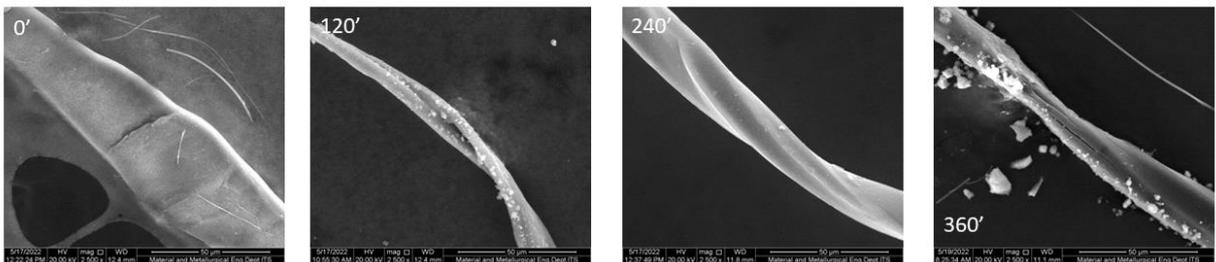
Gambar 4. 14 Hasil SEM 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



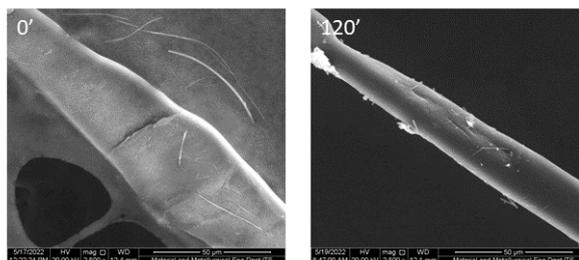
Gambar 4. 15 Hasil SEM 0,1 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



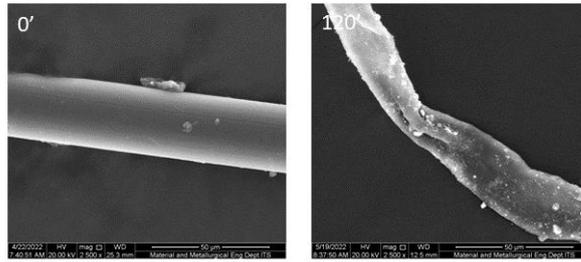
Gambar 4. 16 Hasil SEM 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi $169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



Gambar 4. 17 Hasil SEM 0,1 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



Gambar 4. 18 Hasil SEM 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



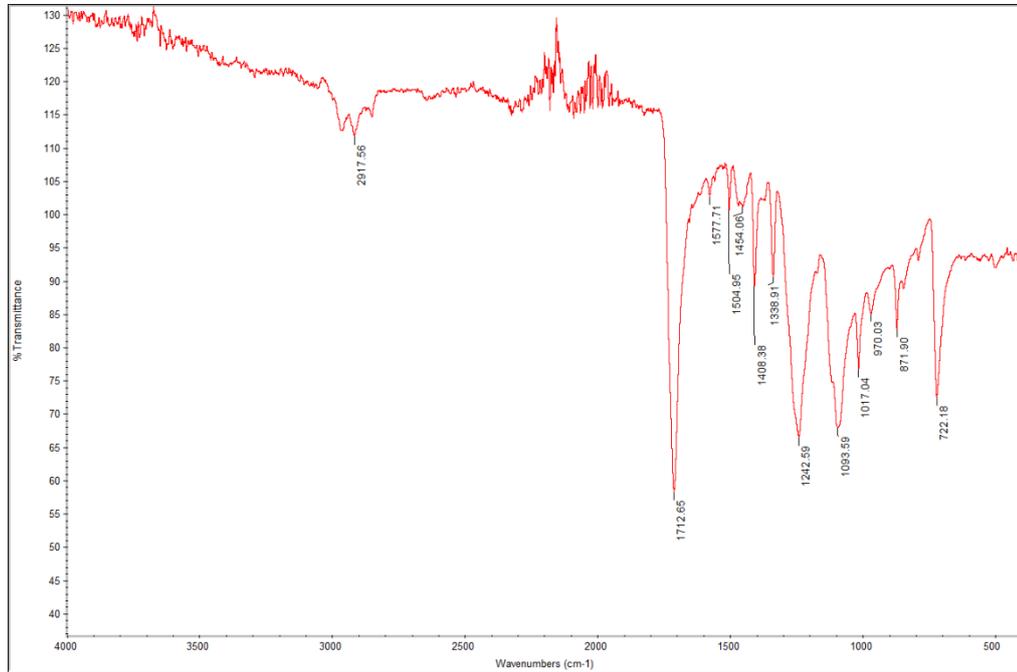
Gambar 4. 19 Hasil SEM 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Dari hasil-hasil tersebut, dapat dilihat bahwa AOP dengan sistem O_3/UV dapat mendegradasi mikroplastik. Namun untuk terjadi mineralisasi total perlu dilakukan waktu kontak yang jauh lebih lama. Sama halnya dengan penelitian yang dilakukan oleh Liu et al. (2021) yang menerapkan AOP berbasis $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, dan UV/Cl_2 pada mikroplastik jenis *polystyrene*. Setelah 12 jam waktu kontak, eksperimen tersebut menunjukkan hasil yang sama yaitu terbentuknya retakan serta merapuhnya permukaan mikroplastik dan belum terjadi mineralisasi total dari mikroplastik. Hal tersebut mungkin dapat terjadi karena susunan molekul polimer yang rapat masih bertahan saat melalui waktu kontak yang pendek, sehingga diperlukan waktu reaksi yang lebih lama agar oksidasi yang lebih jauh dapat terjadi (Zafar et al., 2020)

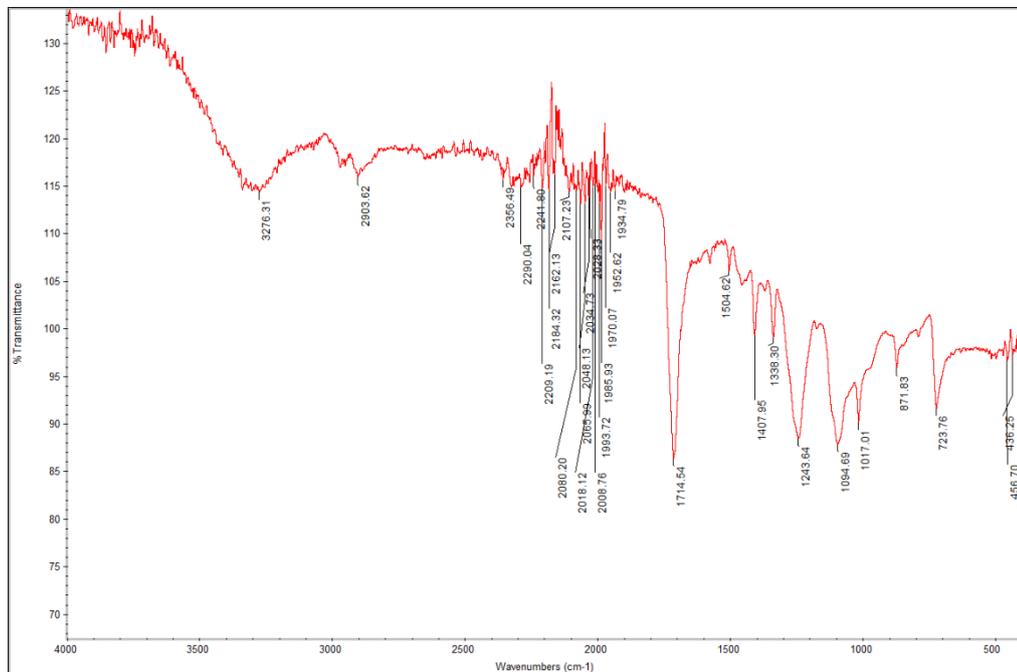
4.2.3 Perubahan Struktur Kimia Serat Mikroplastik

Dilakukan analisis FTIR untuk mengetahui apakah ada perubahan gugus fungsi yang terjadi setelah serat mikroplastik mengalami degradasi. Uji FTIR dilakukan terhadap sampel 0,5 mg/L jenis PET dan PA dengan intensitas iradiasi UV sebesar 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ pada waktu 0 dan setelah 360 menit kontak. Gambar 4.20 menunjukkan spektrum infrared (IR) polimer PET sebelum melalui pengolahan dan Gambar 4.21 setelah 360 menit waktu kontak. Sedangkan spektrum IR polimer PA sebelum melalui pengolahan ditunjukkan pada Gambar 4.22 dan setelah melalui pengolahan selama 360 menit pada Gambar 4.23. Hasil FTIR yang didapat menunjukkan puncak-puncak yang sesuai dengan karakteristik puncak polimer PET dan PA yang ada pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2. Pada spektrum IR PET, intensitas puncak pada bilangan gelombang 1712 dan 1714 cm^{-1} dapat berupa vibrasi *stretching* dari gugus karbonil. Sedangkan intensitas puncak di bilangan gelombang 1242 dan 1243 cm^{-1} merupakan vibrasi *stretching* dari gugus C-O. Intensitas puncak di bilangan gelombang 1093 dan 1094 cm^{-1} juga dapat berasal dari vibrasi *stretching* gugus C-O. sedangkan intensitas puncak pada bilangan gelombang 722 dan 723 cm^{-1} merupakan vibrasi *out-of-plane bending* dari gugus CH aromatik. Pada spektrum IR PA, dapat dilihat terdapat puncak intensitas di bilangan gelombang 3295 dan 3294 cm^{-1} yang dapat berupa vibrasi *stretching* gugus NH. Selanjutnya juga terdapat intensitas puncak pada bilangan gelombang 2931 dan 2933 cm^{-1} yang berhubungan dengan vibrasi *stretching* CH, begitu pula dengan intensitas puncak yang ada di bilangan gelombang 2860 dan 2863 cm^{-1} . Intensitas puncak yang terjadi pada bilangan gelombang 1636 cm^{-1} dapat berupa vibrasi *stretching* gugus karbonil. Sedangkan intensitas puncak yang ada pada bilangan gelombang 1533 dan 1540 cm^{-1} dapat berasal dari vibrasi

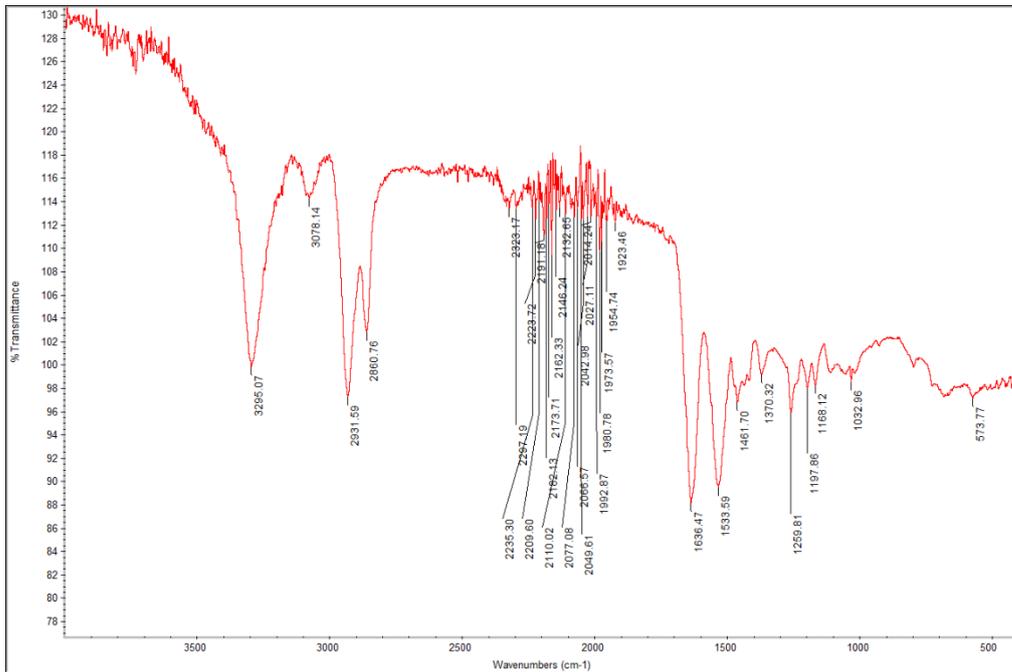
bending gugus NH dan *stretching* gugus C-N. Terakhir, intensitas puncak yang terjadi pada bilangan gelombang 1461 dan 1462 cm^{-1} dapat berupa vibrasi *bending* dari gugus metil.



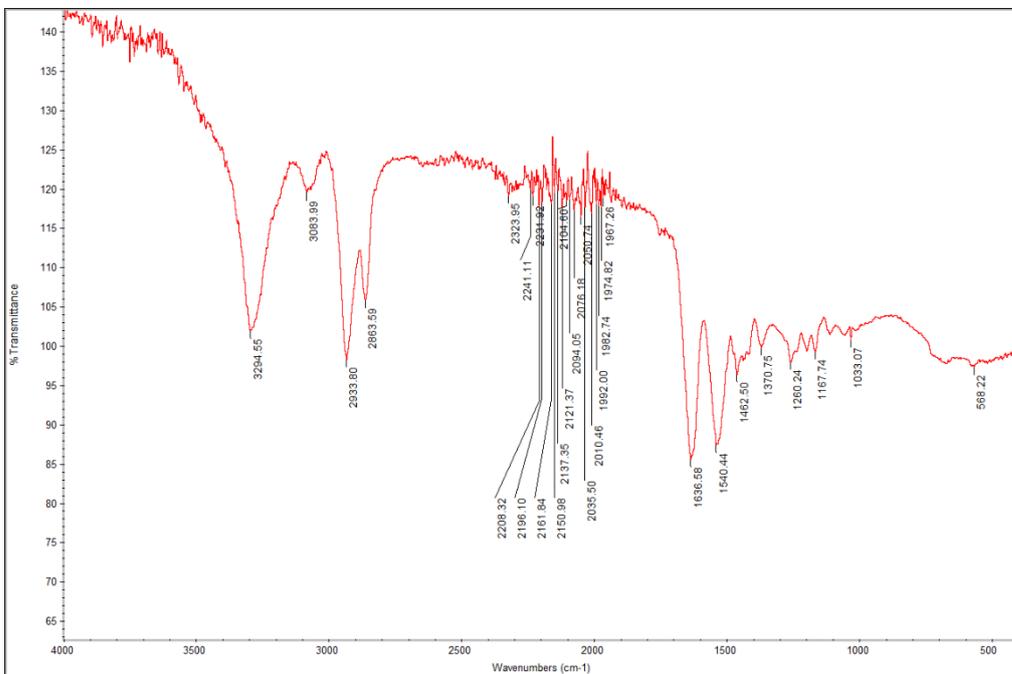
Gambar 4. 20 Spektrum IR PET Murni



Gambar 4. 21 Spektrum IR PET Setelah 360 Menit Waktu Kontak



Gambar 4. 22 Spektrum IR PA Murni

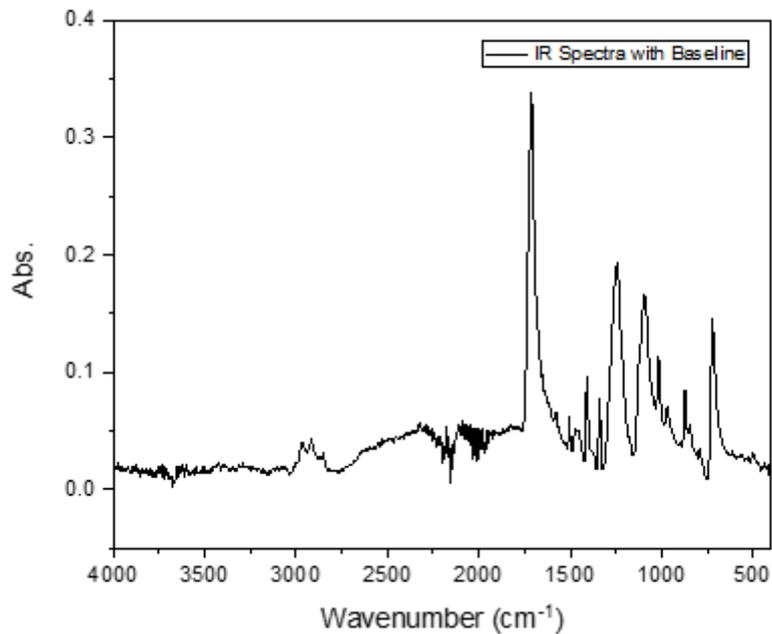


Gambar 4. 23 Spektrum IR PA Setelah 360 Menit Waktu Kontak

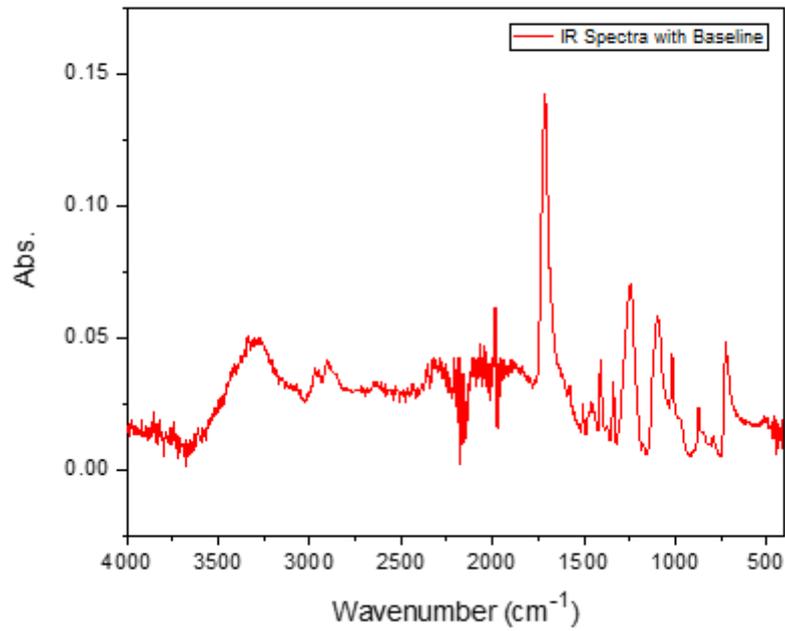
Seperti yang telah disebutkan, degradasi mikroplastik dapat dilihat dari perubahan CI. Peningkatan intensitas dari gugus teroksidasi seperti karbonil (C=O), yang dihubungkan dengan puncak referensi pada spektrum yang sama, dapat menunjukkan ada lebih banyak

gugus teroksigenasi setelah pengolahan dibandingkan dengan kondisi awal (Lee et al., 2020). Untuk mendapatkan nilai CI, perlu dilakukan konversi data menjadi absorbansi dan kemudian dilakukan *baseline correction* menggunakan aplikasi Origin 2018. Hasil konversi dan perbaikan spektrum ditunjukkan pada Gambar 4.24 hingga Gambar 4.27.

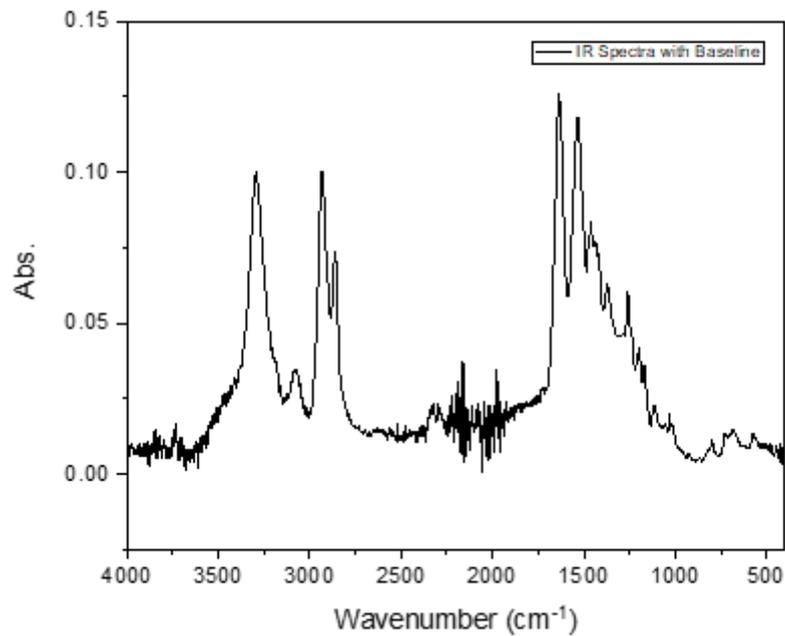
Dari penyesuaian spektrum yang telah dilakukan dapat dihitung nilai CI untuk masing-masing sampel. Serat mikroplastik jenis PET mengalami perubahan nilai CI dari 6,67 menjadi 5,52 setelah pengolahan. Hasil yang sama didapatkan pada penelitian yang dilakukan oleh Lin et al. (2020), di mana PET mengalami penurunan nilai CI yang mengindikasikan terjadinya dekomposisi ikatan yang mengandung oksigen pada permukaan serat mikroplastik. Sedangkan untuk serat mikroplastik jenis PA mengalami perubahan nilai CI dari 1,37 menjadi 2,41 setelah pengolahan. Hasil dari sampel PA sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhu et al. (2020), di mana kandungan karbonil meningkat seiring dengan bertambahnya durasi iradiasi UV.



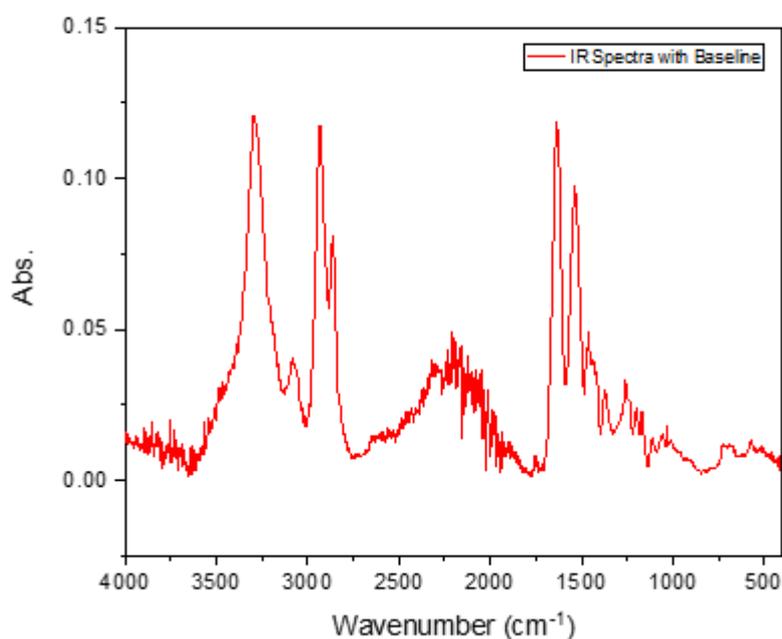
Gambar 4. 24 Konversi Absorbansi Spektrum IR PET Murni



Gambar 4. 25 Konversi Spektrum IR PET Setelah 360 Menit Waktu Kontak



Gambar 4. 26 Konversi Spektrum IR PA Murni



Gambar 4. 27 Konversi Spektrum IR PA Setelah 360 Menit Waktu Kontak

4.2.4 Jalur Degradasi Serat Mikroplastik

Telah dilakukan uji GC-MS untuk mengetahui jalur degradasi yang mungkin terjadi pada serat mikroplastik. Setelah 360 menit iradiasi UV dengan intensitas $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ dan dosis ozon 2 L/menit secara konstan, ditemukan senyawa *Phthalic acid mono-(2-ethylhexyl) ester* dan beberapa alkana pada sampel hasil degradasi PET. *Phthalic acid mono-(2-ethylhexyl) ester* mungkin merupakan hasil foto-oksidasi dari PET karena menurut Gewert et al. (2015), foto-oksidasi PET akan menghasilnya senyawa berakhiran asam karboksilat. Sedangkan pada hasil degradasi jenis PA dengan perlakuan yang sama, tidak ditemukan senyawa turunan dari PA itu sendiri seperti yang ditemukan oleh Achhammer et al. (1951) yaitu karbon dioksida, etanol, dan hidrokarbon. Lee et al. (2020) juga menyatakan bahwa degradasi PA tidak menghasilkan alkohol maupun asam karboksilat. Tetapi justru ditemukan senyawa yang mengandung unsur sulfur yang mungkin terbentuk dari zat warna serat mikroplastik.

Tabel 4. 3 Hasil GC-MS Sampel 0,5 mg/L PET dengan Intensitas Iradiasi UV $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

Nama Senyawa	% Normalisasi
120 Menit Waktu Kontak	
(Metilsulfanil) Metil	13,93%
Dimetil disulfida	55,66%
<i>Dimethoxysulfone</i>	5,11%
360 Menit Waktu Kontak	
(Metilsulfanil) Metil	36,44%

Metil disulfida	14,36%
<i>Dimethoxysulfone</i>	3,38%
<i>Tetracosane</i>	2,08%
<i>Icosane</i>	1,68%
<i>Phthalic acis, mono-(2-ethylhexyl) ester</i>	2,94%
<i>Hexacosane</i>	1,28%
<i>Eicosane</i>	2,03%

Tabel 4. 4 Hasil GC-MS Sampel 0,5 mg/L PA dengan Intensitas Iradiasi UV 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Nama Senyawa	% Normalisasi
120 Menit Waktu Kontak	
Oksosulfan oksida	52,11%
360 Menit Waktu Kontak	
Sulfat anhidrat	33,16%

4.3 Kondisi Optimum AOP Sistem O_3/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik

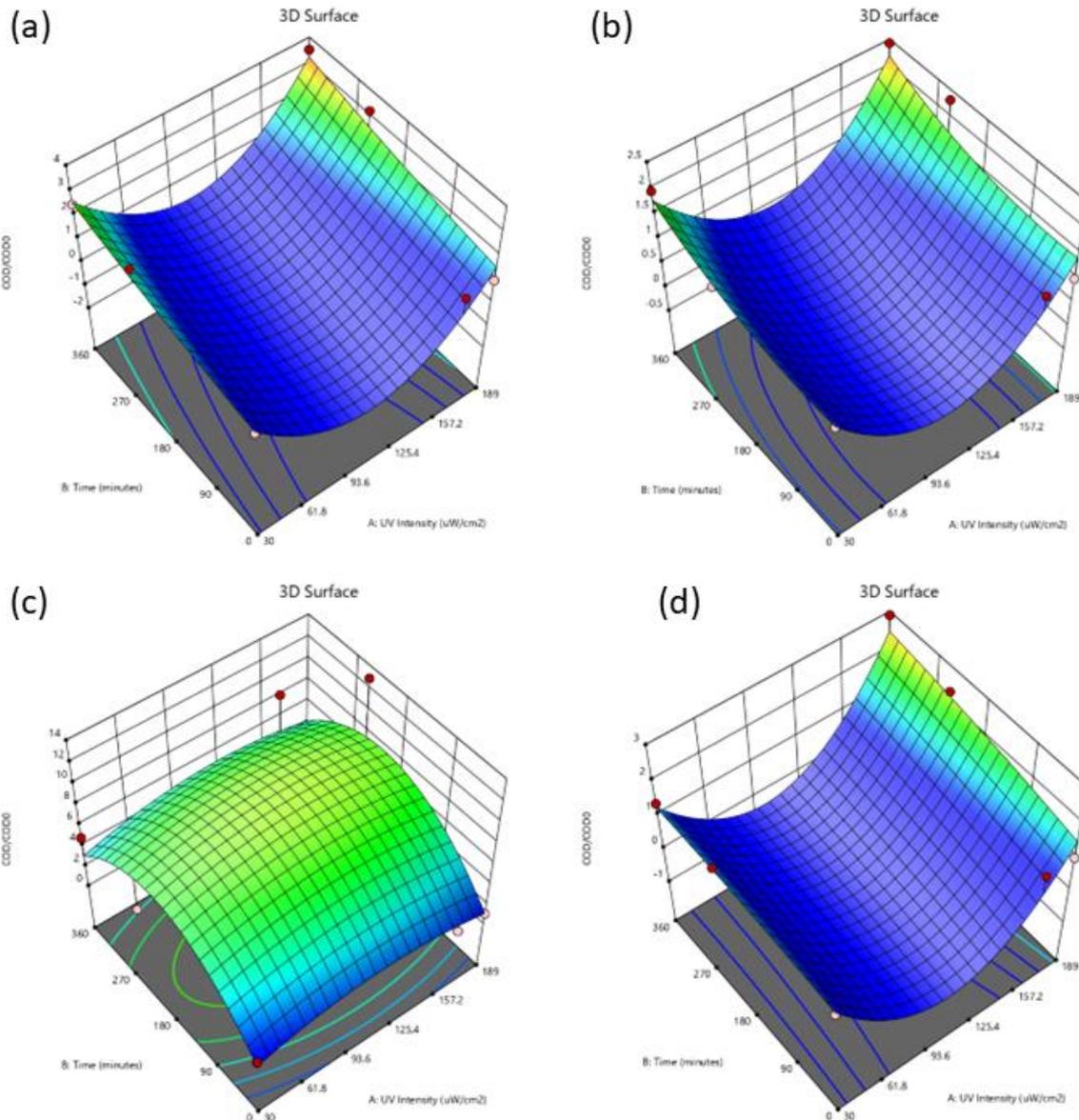
Penentuan kondisi optimum operasi AOP dalam mendegradasi serat mikroplastik diawali dengan mempelajari pengaruh kondisi pengolahan meliputi intensitas iradiasi UV, jenis polimer, dan konsentrasi mikroplastik terhadap degradasi mikroplastik tersebut.

4.3.1 Pengaruh Intensitas UV dan Waktu Kontak terhadap Degradasi Serat Mikroplastik

Dari hasil SEM yang telah ditunjukkan dapat dilihat bahwa intensitas UV dan waktu kontak berpengaruh pada skala degradasi yang terjadi pada serat mikroplastik. Untuk memastikan hubungan komponen tersebut terhadap degradasi serat mikroplastik, telah dilakukan uji statistik berdasarkan hasil analisis COD yang diperoleh. Untuk kelompok 0,1 mg/L PET, diperoleh nilai p sebesar 0,001 ($p < 0,05$) pada faktor waktu kontak yang berarti terdapat perbedaan degradasi serat mikroplastik berdasarkan faktor tersebut. Hasil yang sama juga didapat untuk kelompok 0,5 mg/L PET, diperoleh nilai p sebesar 0,01 ($p < 0,05$) pada faktor waktu kontak. Sedangkan untuk kelompok 0,1 mg/L PA, tidak diperoleh nilai p yang signifikan untuk semua faktornya. Selanjutnya, untuk kelompok 0,5 mg/L PA, diperoleh nilai p sebesar 0,01 ($p < 0,05$) pada faktor intensitas UV yang berarti terdapat perbedaan degradasi serat mikroplastik berdasarkan faktor tersebut. Dari hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa intensitas UV dan waktu kontak memiliki pengaruh terhadap besarnya degradasi serat mikroplastik yang terjadi.

Selain berdasarkan hasil uji statistik dengan metode ANOVA, dibuat juga model grafik untuk melihat kondisi mana yang menghasilkan degradasi paling besar untuk setiap kelompok jenis polimer dan konsentrasinya. Gambar 4.28 menunjukkan hasil model grafik dari data yang dimiliki. Terlihat pada kelompok 0,1 mg/L PET (a), 0,5 mg/L PET (b), dan 0,5 mg/L PA (d) bahwa degradasi paling besar terjadi pada penggunaan intensitas iradiasi UV paling tinggi yaitu 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dan waktu kontak paling lama yaitu 360 menit. Berbeda dengan kelompok 0,1 mg/L PA (c) yang menunjukkan degradasi terbesar di penggunaan intensitas iradiasi UV 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dan waktu kontak 240 menit. Hasil ini didapat melihat bagaimana pada kelompok 0,1 mg/L PA, COD meningkat pesat di waktu 240 menit dan yang menunjukkan pola peningkatan paling baik adalah penggunaan intensitas iradiasi UV sebesar 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Dari hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa degradasi serat mikroplastik paling besar dihasilkan oleh penerapan intensitas iradiasi UV sebesar $189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ selama 360 menit. Seperti yang telah dijelaskan, untuk terjadi oksidasi yang lebih besar dibutuhkan waktu yang lebih lama. Walaupun AOP berbasis O_3/UV dapat mendegradasi serat mikroplastik, akan sangat tidak praktis untuk menerapkan teknologi tersebut dalam skala besar karena waktu kontak yang dibutuhkan sangat lama.



Gambar 4. 28 Model Grafik Desain Optimal

Model grafik yang telah dibuat juga menghasilkan persamaan yang dapat digunakan untuk memperkirakan respons dari variasi intensitas iradiasi UV dan waktu kontak yang digunakan. Jenjang variasi yang diterapkan harus memiliki satuan yang sama dengan yang digunakan dalam eksperimen. Persamaan 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4 menunjukkan persamaan fungsi intensitas iradiasi UV dan waktu kontak untuk variasi 0,1 mg/L PET, 0,5 mg/L PET,

0,1 mg/L PA, dan 0,5 mg/L secara berurutan dengan A merupakan intensitas iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) dan B adalah waktu kontak (menit).

$$\text{COD}_t/\text{COD}_0 = 3,43831 - 0,091458A + 0,00270B + (3,75246 \times 10^{-6})AB + 0,000431A^2 + (3,61385 \times 10^{-6})B^2 \quad (4.1)$$

$$\text{COD}_t/\text{COD}_0 = 2,29493 - 0,049482A - 0,000803B + (6,04569 \times 10^{-7})AB + 0,000237A^2 + (7,96368 \times 10^{-6})B^2 \quad (4.2)$$

$$\text{COD}_t/\text{COD}_0 = -0,781642 + 0,051966A + 0,062167B + 0,000011AB - 0,000224A^2 - 0,000154B^2 \quad (4.3)$$

$$\text{COD}_t/\text{COD}_0 = 2,98530 - 0,074285A + 0,000980B + 0,000014AB + 0,000351A^2 - (2,4188 \times 10^{-6})B^2 \quad (4.4)$$

4.3.2 Pengaruh Jenis Polimer terhadap Degradasi Serat Mikroplastik

Dalam penelitian ini digunakan dua variasi jenis polimer yaitu *polyethylene terephthalate* (PET) dan *polyamide* (PA). Dilakukan analisis statistik untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan besar degradasi yang terjadi pada kedua jenis polimer tersebut. Semua variasi konsentrasi serat mikroplastik dan intensitas iradiasi UV menghasilkan nilai $p > 0,05$ yang menunjukkan tidak adanya perbedaan perubahan rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ berdasarkan jenis polimer yang digunakan. Hasil tersebut mungkin didapat karena data yang dimiliki kurang mendukung untuk membuktikan adanya perbedaan besar degradasi yang terjadi pada kedua jenis polimer tersebut. Menurut Chamas et al. (2020), laju degradasi plastik bergantung pada karakteristik intrinsiknya seperti jenis polimer dan berat molekul serta karakteristik ekstrinsik seperti ukuran, bentuk, dan luas permukaan.

4.3.3 Pengaruh Konsentrasi Serat Mikroplastik terhadap Degradasinya

Dalam penelitian ini digunakan dua variasi konsentrasi serat mikroplastik yaitu 0,1 dan 0,5 mg/L. Dilakukan analisis statistik untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan besar degradasi yang terjadi pada serat mikroplastik dari kedua konsentrasi serat mikroplastik tersebut. Semua variasi jenis polimer dan intensitas iradiasi UV menghasilkan nilai $p > 0,05$ yang menunjukkan tidak adanya perbedaan perubahan rasio $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ berdasarkan konsentrasi serat mikroplastik yang diolah. Hasil yang tidak signifikan mungkin diakibatkan kurangnya data yang dimiliki untuk membuktikan adanya perbedaan antara kedua konsentrasi serat mikroplastik. Walaupun faktor waktu kontak lebih mempengaruhi besar degradasi yang terjadi, dosis ozon yang ditingkatkan juga dapat menambah besar degradasi mikroplastik (Zafar et al., 2020). Karena dalam penelitian ini digunakan dosis ozon yang konstan, terdapat kemungkinan jika diterapkan dosis ozon yang lebih besar dapat meningkatkan degradasi konsentrasi mikroplastik yang lebih besar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. AOP menggunakan sistem O₃/UV dapat mendegradasi serat mikroplastik jenis PET maupun PA ditandai dengan perubahan morfologi dan struktur kimia permukaan serat mikroplastik serta meningkatnya COD dalam air. Tetapi sistem dengan kondisi eksperimen yang dilakukan belum efektif untuk mendegradasi dan memineralisasi total serat mikroplastik karena secara bentuk dan ukuran masih banyak mikroplastik yang menyerupai kondisi awal.
2. Berdasarkan variasi kondisi yang diterapkan, penggunaan intensitas iradiasi sebesar 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dengan waktu kontak selama 360 menit menunjukkan degradasi paling besar melihat bagaimana pada kondisi tersebut perubahan morfologi dan peningkatan COD sangat signifikan dibandingkan dengan kondisi lainnya.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian dengan waktu kontak yang lebih lama.
2. Melakukan penelitian dengan intensitas iradiasi UV yang lebih besar.
3. Mempelajari pengaruh ozon pada AOP sistem O₃/UV terhadap degradasi serat mikroplastik dan dibandingkan dengan pengaruh intensitas iradiasi UV dan lama waktu kontak.
4. Melakukan penelitian dengan dosis ozon yang lebih besar.
5. Melakukan penelitian penerapan AOP sistem O₃/UV untuk mendegradasi mikroplastik jenis dan bentuk lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., & Mohammed, A. (2019). Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *International Conference on Hydraulics and Pneumatics, January*, 1–9.
- Achhammer, B. G., Reinhart, F. W., & Kline, G. M. (1951). Mechanism of the degradation of polyamides. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 46(5), 391. <https://doi.org/10.6028/jres.046.044>
- Almond, J., Sugumaar, P., Wenzel, M. N., Hill, G., & Wallis, C. (2020). Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy. *E-Polymers*, 20(1), 369–381. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0041>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2017.02.013>
- Bayo, J., Olmos, S., & López-Castellanos, J. (2020). Microplastics in an urban wastewater treatment plant: The influence of physicochemical parameters and environmental factors. *Chemosphere*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124593>
- Bevans, R. (2020). *Two-way ANOVA | When and How to Use it, With Examples*. <https://www.scribbr.com/statistics/two-way-anova/>
- Bui, X. T., Vo, T. D. H., Nguyen, P. T., Nguyen, V. T., Dao, T. S., & Nguyen, P. D. (2020). Microplastics pollution in wastewater: Characteristics, occurrence and removal technologies. *Environmental Technology and Innovation*, 19, 101013. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101013>
- Buwono, N. R., Risjani, Y., & Soegianto, A. (2021). Distribution of microplastic in relation to water quality parameters in the Brantas River, East Java, Indonesia. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 101915. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101915>
- Cai, L., Wang, J., Peng, J., Wu, Z., & Tan, X. (2018). Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments. *Science of the Total Environment*, 628–629, 740–747. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.079>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 17, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(9), 3494–3511.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>

- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science and Technology*, 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- Dutta, A. (2017). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization* (Vol. 2). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46140-5.00004-2>
- Eerkes-Medrano, D., & Thompson, R. (2018). Occurrence, Fate, and Effect of Microplastics in Freshwater Systems. *Microplastic Contamination in Aquatic Environments: An Emerging Matter of Environmental Urgency*, 95–132. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00004-7>
- Enfrin, M., Dumée, L. F., & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. In *Water Research* (Vol. 161, pp. 621–638). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.049>
- Freeman, S., Booth, A. M., Sabbah, I., Tiller, R., Dierking, J., Klun, K., Rotter, A., Ben-David, E., Javidpour, J., & Angel, D. L. (2020). Between source and sea: The role of wastewater treatment in reducing marine microplastics. *Journal of Environmental Management*, 266(February), 110642. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110642>
- Gewert, B., Plassmann, M. M., & Macleod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. In *Environmental Sciences: Processes and Impacts* (Vol. 17, Issue 9, pp. 1513–1521). <https://doi.org/10.1039/c5em00207a>
- Gong, J., & Xie, P. (2020). Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics. *Chemosphere*, 254, 126790. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126790>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. In *Journal of Geophysical Research: Oceans* (Vol. 125, Issue 1). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Harrison, J. P., Ojeda, J. J., & Romero-González, M. E. (2012). The applicability of reflectance micro-Fourier-transform infrared spectroscopy for the detection of synthetic microplastics in marine sediments. *Science of the Total Environment*, 416, 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.078>
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L., & Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science and Technology*, 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution*, 160(1), 42–48.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.052>

- Hübschmann, H.-J. (2015). *Handbook of GC-MS: Fundamentals and Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Inkson, B. J. (2016). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization. In *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>
- Kim, S., Sin, A., Nam, H., Park, Y., Lee, H., & Han, C. (2022). Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent trend. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100213>
- Krylova, V., & Dukštienė, N. (2019). The structure of PA-Se-S-Cd composite materials probed with FTIR spectroscopy. *Applied Surface Science*, 470(October 2018), 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.121>
- Kurnianto, A. (2019). *ANALISIS KUALITAS AIR SUNGAI KALIMAS KOTA SURABAYA MENGGUNAKAN METODE INDEKS PENCEMARAN* [Universitas Islam Negeri Sunan Ampel]. <http://digilib.uinsby.ac.id/id/eprint/34500>
- Lambert, S., & Wagner, M. (2016). Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene. *Chemosphere*, 145, 265–268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.078>
- Lee, J. M., Busquets, R., Choi, I. C., Lee, S. H., Kim, J. K., & Campos, L. C. (2020). Photocatalytic degradation of polyamide 66: Evaluating the feasibility of photocatalysis as a microfibre-targeting technology. *Water (Switzerland)*, 12(12), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12123551>
- Lestari, P., Trihadiningrum, Y., Wijaya, B. A., Yunus, K. A., & Firdaus, M. (2020). Distribution of microplastics in Surabaya River, Indonesia. *Science of the Total Environment*, 726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138560>
- Li, J., Liu, H., & Paul Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*, 137, 362–374. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2017.12.056>
- Lin, J., Yan, D., Fu, J., Chen, Y., & Ou, H. (2020). Ultraviolet-C and vacuum ultraviolet inducing surface degradation of microplastics. *Water Research*, 186, 116360. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116360>
- Liu, X., Sun, P., Qu, G., Jing, J., Zhang, T., Shi, H., & Zhao, Y. (2021). Insight into the characteristics and sorption behaviors of aged polystyrene microplastics through three type of accelerated oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 407(December 2020), 124836. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124836>
- Nabi, I., Bacha, A. U. R., Li, K., Cheng, H., Wang, T., Liu, Y., Ajmal, S., Yang, Y., Feng, Y., & Zhang, L. (2020). Complete Photocatalytic Mineralization of Microplastic on TiO₂ Nanoparticle Film. *IScience*, 23(7). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101326>
- Picó, Y., & Barceló, D. (2019). Analysis and prevention of microplastics pollution in water: Current perspectives and future directions. *ACS Omega*, 4(4), 6709–6719. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00222>

- Prasad, S. G., De, A., & De, U. (2011). Structural and Optical Investigations of Radiation Damage in Transparent PET Polymer Films. *International Journal of Spectroscopy*, 2011, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/810936>
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Radityaningrum, A. D., Trihadiningrum, Y., Mar'atusholihah, Soedjono, E. S., & Herumurti, W. (2021). Microplastic contamination in water supply and the removal efficiencies of the treatment plants: A case of Surabaya City, Indonesia. *Journal of Water Process Engineering*, 43(July), 102195. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102195>
- Ricardo, I. A., Alberto, E. A., Silva Júnior, A. H., Macuvele, D. L. P., Padoin, N., Soares, C., Gracher Riella, H., Starling, M. C. V. M., & Trovó, A. G. (2021). A critical review on microplastics, interaction with organic and inorganic pollutants, impacts and effectiveness of advanced oxidation processes applied for their removal from aqueous matrices. *Chemical Engineering Journal*, 424(April). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130282>
- Sarkar, D. J., Das Sarkar, S., Das, B. K., Praharaj, J. K., Mahajan, D. K., Purokait, B., Mohanty, T. R., Mohanty, D., Gogoi, P., Kumar V, S., Behera, B. K., Manna, R. K., & Samanta, S. (2021). Microplastics removal efficiency of drinking water treatment plant with pulse clarifier. *Journal of Hazardous Materials*, 413(February), 125347. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125347>
- Shen, M., Song, B., Zhu, Y., Zeng, G., Zhang, Y., Yang, Y., Wen, X., Chen, M., & Yi, H. (2020). Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions. *Chemosphere*, 251, 126612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126612>
- Smalheiser, N. R. (2017). Nonparametric Tests. *Data Literacy*, 157–167. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811306-6.00012-9>
- Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Jung, S. W., & Shim, W. J. (2017). Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type. *Environmental Science and Technology*, 51(8), 4368–4376. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06155>
- Suhrhoff, T. J., & Scholz-Böttcher, B. M. (2016). Qualitative impact of salinity, UV radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics - A lab experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.054>
- Veerasingam, S., Ranjani, M., Venkatachalapathy, R., Bagaev, A., Mukhanov, V., Litvinyuk, D., Mugilarasan, M., Gurumoorthi, K., Gunganathan, L., Aboobacker, V. M., & Vethamony, P. (2021). Contributions of Fourier transform infrared spectroscopy in microplastic pollution research: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(22), 2681–2743. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807450>
- Wardenier, N., Liu, Z., Nikiforov, A., Van Hulle, S. W. H., & Leys, C. (2019). Micropollutant elimination by O₃, UV and plasma-based AOPs: An evaluation of treatment and energy

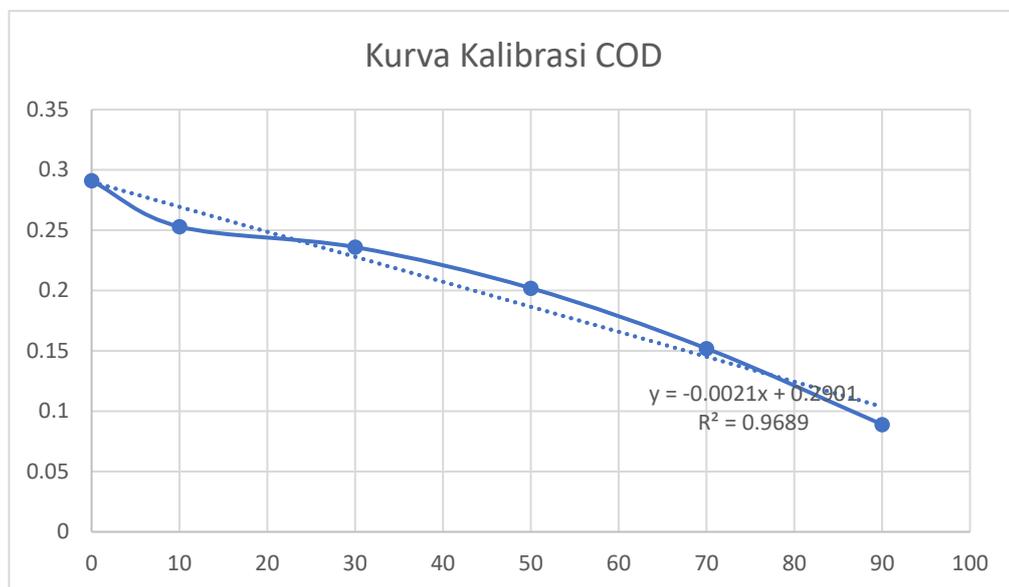
- costs. *Chemosphere*, 234, 715–724. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.033>
- Willard, C. A. (2020). *Statistical Methods: An Introduction to Basic Statistical Concepts and Analysis*. In *Taylor & Francis Group*. Routledge.
- Xu, B., Liu, F., Cryder, Z., Huang, D., Lu, Z., He, Y., Wang, H., Lu, Z., Brookes, P. C., Tang, C., Gan, J., & Xu, J. (2020). Microplastics in the soil environment: Occurrence, risks, interactions and fate—A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(21), 2175–2222. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1694822>
- Zafar, R., Park, S. Y., & Kim, C. G. (2020). Surface modification of polyethylene microplastic particles during the aqueous-phase ozonation process. *Environmental Engineering Research*, 26(5), 200412–0. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.412>
- Zhang, K., Xiong, X., Hu, H., Wu, C., Bi, Y., Wu, Y., Zhou, B., Lam, P. K. S., & Liu, J. (2017). Occurrence and Characteristics of Microplastic Pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science and Technology*, 51(7), 3794–3801. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00369>
- Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 203). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
- Zhu, K., Jia, H., Sun, Y., Dai, Y., Zhang, C., Guo, X., Wang, T., & Zhu, L. (2020). Long-term phototransformation of microplastics under simulated sunlight irradiation in aquatic environments: Roles of reactive oxygen species. *Water Research*, 173, 115564. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115564>

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran A. Kurva Kalibrasi COD Kadar Rendah *Closed Reflux*

Tabel A. 1 Data Absorbansi Larutan Kerja COD Kadar Rendah

Kadar COD (mgO ₂ /L)	A
0	0,291
10	0,253
30	0,236
50	0,202
70	0,152
90	0,089
100	0,029



Gambar A. 1 Kurva Kalibrasi COD Kadar Rendah

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran B. Hasil Analisis COD

Nilai COD diperoleh dari nilai absorbansi sampel uji yang kemudian dimasukkan ke dalam nilai y pada persamaan linear dari kurva kalibrasi yang telah dibuat. Berikut contoh perhitungan untuk hasil absorbansi sampel uji variasi A₂B₁C₁ pada waktu 0 menit:

$$y = -0,0021x + 0,2901$$

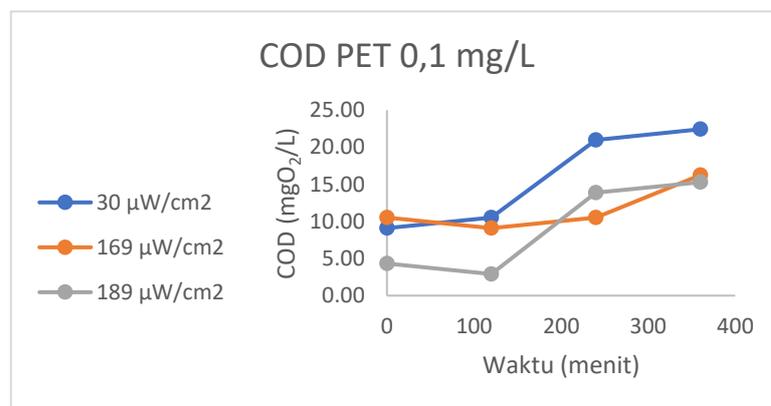
$$x = \frac{0,2901 - y}{0,0021}$$

$$x = \frac{0,2901 - 0,271}{0,0021}$$

$$= 9,10 \text{ mgO}_2/\text{L}$$

Tabel B. 1 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,1 mg/L PET

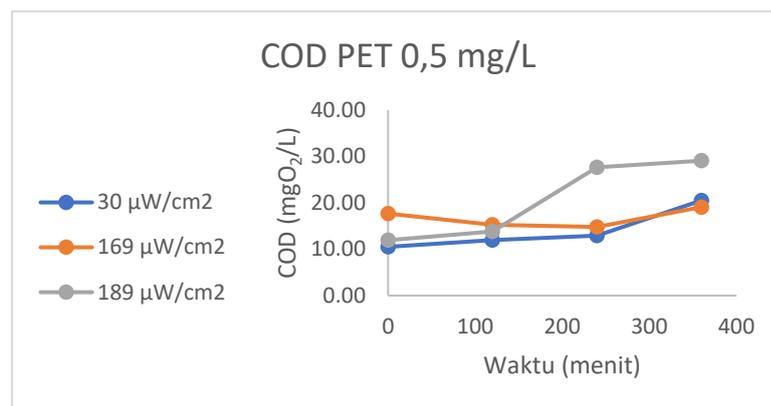
Percobaan	t (menit)	A	COD (mgO ₂ /L)
A2B1C1	0	0,271	9,10
A2B1C1	120	0,268	10,52
A2B1C1	240	0,246	21,00
A2B1C1	360	0,243	22,43
A2B2C1	0	0,268	10,52
A2B2C1	120	0,271	9,10
A2B2C1	240	0,268	10,52
A2B2C1	360	0,256	16,24
A2B3C1	0	0,281	4,33
A2B3C1	120	0,284	2,90
A2B3C1	240	0,261	13,86
A2B3C1	360	0,258	15,29



Gambar B. 1 Grafik COD Sampel Uji 0,1 mg/L PET

Tabel B. 2 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,5 mg/L PET

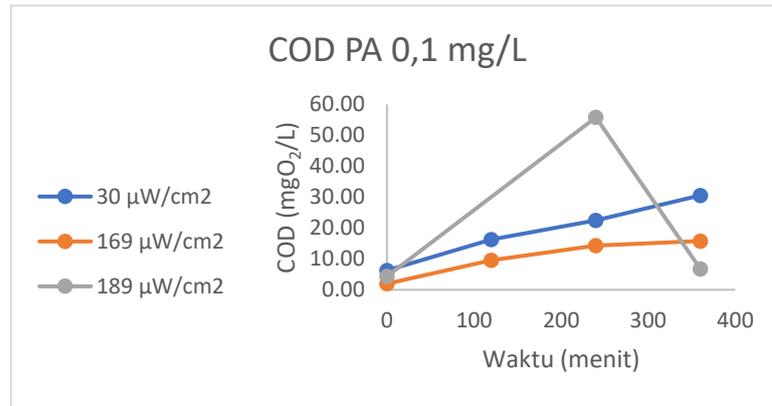
Percobaan	t (menit)	A	COD (mgO ₂ /L)
A1B1C1	0	0,268	10,52
A1B1C1	120	0,265	11,95
A1B1C1	240	0,263	12,90
A1B1C1	360	0,247	20,52
A1B2C1	0	0,253	17,67
A1B2C1	120	0,258	15,29
A1B2C1	240	0,259	14,81
A1B2C1	360	0,25	19,10
A1B3C1	0	0,265	11,95
A1B3C1	120	0,261	13,86
A1B3C1	240	0,232	27,67
A1B3C1	360	0,229	29,10



Gambar B. 2 Grafik COD Sampel Uji 0,5 mg/L PET

Tabel B. 3 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,1 mg/L PA

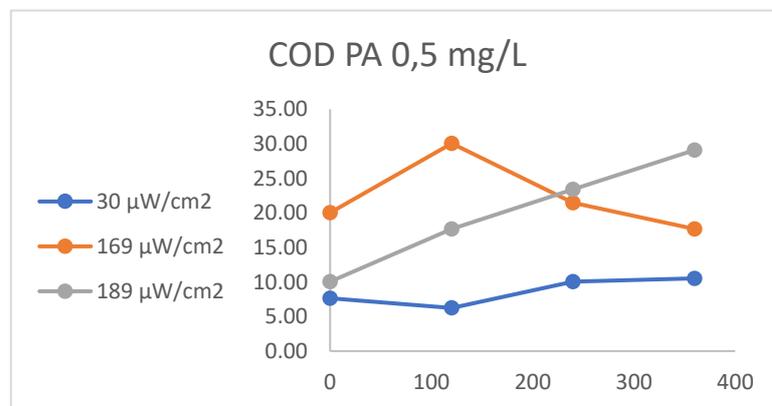
Percobaan	t (menit)	A	COD (mgO ₂ /L)
A2B1C2	0	0,277	6,24
A2B1C2	120	0,256	16,24
A2B1C2	240	0,243	22,43
A2B1C2	360	0,226	30,52
A2B2C2	0	0,29	1,95
A2B2C2	120	0,27	9,57
A2B2C2	240	0,26	14,33
A2B2C2	360	0,257	15,76
A2B3C2	0	0,281	4,33
A2B3C2	240	0,173	55,76
A2B3C2	360	0,276	6,71



Gambar B. 3 Grafik COD Sampel Uji 0,1 mg/L PA

Tabel B. 4 Hasil Pengukuran COD Variasi 0,5 mg/L PA

Percobaan	t (menit)	A	COD (mgO ₂ /L)
A1B1C2	0	0,274	7,67
A1B1C2	120	0,277	6,24
A1B1C2	240	0,269	10,05
A1B1C2	360	0,268	10,52
A1B2C2	0	0,248	20,05
A1B2C2	120	0,227	30,05
A1B2C2	240	0,245	21,48
A1B2C2	360	0,253	17,67
A1B3C2	0	0,269	10,05
A1B3C2	120	0,253	17,67
A1B3C2	240	0,241	23,38
A1B3C2	360	0,229	29,10



Gambar B. 4 Grafik COD Sampel Uji 0,5 mg/L PA

Karena grafik dari hasil COD menunjukkan kondisi awal yang berbeda-beda, besar degradasi sulit diidentifikasi untuk setiap variasinya. Maka dari itu data dimodifikasi menjadi

bentu rasio agar dapat menunjukkan kondisi awal yang sama. Berikut contoh perhitungan rasio COD_t/COD_0 untuk variasi $A_2B_1C_1$ pada waktu 120 menit:

$$COD_0 = 9,10 \text{ mgO}_2/\text{L}$$

$$COD_{120} = 10,52 \text{ mgO}_2/\text{L}$$

$$COD_{120}/COD_0 = \frac{10,51 \text{ mgO}_2/\text{L}}{9,10 \text{ mgO}_2/\text{L}}$$

$$= 1,16$$

Tabel B. 5 Rasio COD_t/COD_0 Variasi 0,1 mg/L PET

Percobaan	t (menit)	COD (mgO ₂ /L)	COD_t/COD_0
A2B1C1	0	9,10	1,00
A2B1C1	120	10,52	1,16
A2B1C1	240	21,00	2,31
A2B1C1	360	22,43	2,47
A2B2C1	0	10,52	1,00
A2B2C1	120	9,10	0,86
A2B2C1	240	10,52	1,00
A2B2C1	360	16,24	1,54
A2B3C1	0	4,33	1,00
A2B3C1	120	2,90	0,67
A2B3C1	240	13,86	3,20
A2B3C1	360	15,29	3,53

Tabel B. 6 Rasio COD_t/COD_0 Variasi 0,5 mg/L PET

Percobaan	t (menit)	COD (mgO ₂ /L)	COD_t/COD_0
A1B1C1	0	10,52	1,00
A1B1C1	120	11,95	1,14
A1B1C1	240	12,90	1,23
A1B1C1	360	20,52	1,95
A1B2C1	0	17,67	1,00
A1B2C1	120	15,29	0,87
A1B2C1	240	14,81	0,84
A1B2C1	360	19,10	1,08
A1B3C1	0	11,95	1,00
A1B3C1	120	13,86	1,16
A1B3C1	240	27,67	2,31
A1B3C1	360	29,10	2,43

Tabel B. 7 Rasio COD_t/COD_0 Variasi 0,1 mg/L PA

Percobaan	t (menit)	COD (mgO ₂ /L)	COD_t/COD_0
A2B1C2	0	6,24	1
A2B1C2	120	16,24	2,60
A2B1C2	240	22,43	3,60
A2B1C2	360	30,52	4,89
A2B2C2	0	1,95	1
A2B2C2	120	9,57	4,90
A2B2C2	240	14,33	7,34
A2B2C2	360	15,76	8,07
A2B3C2	0	4,33	1
A2B3C2	240	55,76	12,87
A2B3C2	360	6,71	1,55

Tabel B. 8 Rasio COD_t/COD_0 Variasi 0,5 mg/L PA

Percobaan	t (menit)	COD (mgO ₂ /L)	COD_t/COD_0
A1B1C2	0	7,67	1,00
A1B1C2	120	6,24	0,81
A1B1C2	240	10,05	1,31
A1B1C2	360	10,52	1,37
A1B2C2	0	20,05	1,00
A1B2C2	120	30,05	1,50
A1B2C2	240	21,48	1,07
A1B2C2	360	17,67	0,88
A1B3C2	0	10,05	1,00
A1B3C2	120	17,67	1,76
A1B3C2	240	23,38	2,33
A1B3C2	360	29,10	2,90

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran C. Hasil Analisis FTIR

Data bilangan gelombang dan intensitas puncak dalam transmitans hasil uji FTIR dari PET murni ditunjukkan pada Tabel C.1.

Tabel C. 1 Intensitas Puncak Spektrum IR PET Murni

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)
722,18	72,429
871,9	82,706
970,03	85,075
1017,04	76,668
1093,59	67,824
1242,59	66,418
1338,91	90,475
1408,38	89,149
1454,06	101,07
1504,95	100,604
1577,71	102,611
1712,65	58,167
2917,56	111,755

Selanjutnya dilakukan konversi data dari persen transmitans menjadi absorbansi menggunakan rumus berikut,

$$\text{Absorbansi} = 2 - \log(\%T)$$

Berikut merupakan contoh perhitungan konversi persen transmitans menjadi absorbansi untuk data intensitas puncak pada bilangan gelombang 722,18 cm⁻¹ spektrum IR PET Murni.

$$\%T = 72,429$$

$$\begin{aligned} \text{Absorbansi} &= 2 - \log(72,429) \\ &= 0,140 \end{aligned}$$

Kemudian data bilangan gelombang dan intensitas dalam absorbansi dimasukkan ke dalam aplikasi Origin 2018 untuk dilakukan *baseline correction* karena hasil transmitans dari uji FTIR ada yang melebihi 100%. *Baseline correction* dilakukan dengan memanfaatkan fitur "Subtract baseline" pada opsi "Peak analyzer". Dari perlakuan tersebut kemudian dihasilkan nilai absorbansi yang sudah disesuaikan. Konversi dan perbaikan basis dilakukan untuk setiap spektrum IR dan hasilnya secara keseluruhan ditampilkan pada Tabel C.2 hingga C.5.

Tabel C. 2 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PET Murni

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
722,18	72,429	0,140	0,146
871,9	82,706	0,082	0,085
970,03	85,075	0,070	0,070
1017,04	76,668	0,115	0,114
1093,59	67,824	0,169	0,166
1242,59	66,418	0,178	0,194
1338,91	90,475	0,043	0,077
1408,38	89,149	0,050	0,096
1454,06	101,07	-0,005	0,050
1504,95	100,604	-0,003	0,062
1577,71	102,611	-0,011	0,067
1712,65	58,167	0,235	0,338
2917,56	111,755	-0,048	0,043

Tabel C. 3 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PET Setelah 360 Menit Waktu Kontak

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
415,89	96,784	0,014	0,018
436,25	97,205	0,012	0,017
456,7	96,577	0,015	0,020
723,76	91,518	0,038	0,048
871,83	95,802	0,019	0,024
1017,01	90,096	0,045	0,043
1094,69	87,78	0,057	0,058
1243,64	88,346	0,054	0,070
1338,3	98,982	0,004	0,033
1407,95	99,202	0,003	0,041
1504,62	106,028	-0,025	0,025
1714,54	86,328	0,064	0,142
1934,79	114,404	-0,058	0,041
1952,62	114,223	-0,058	0,042
1970,07	114,89	-0,060	0,039
1985,93	109,187	-0,038	0,061
1993,72	113,113	-0,054	0,046
2008,76	115,216	-0,062	0,038
2018,12	114,799	-0,060	0,040
2028,33	115,465	-0,062	0,037
2034,73	113,752	-0,056	0,044

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
2048,13	113,104	-0,053	0,047
2065,99	112,992	-0,053	0,047
2080,2	114,49	-0,059	0,041
2107,23	114,344	-0,058	0,042
2162,13	116,057	-0,065	0,035
2184,32	114,811	-0,060	0,042
2356,49	115,557	-0,063	0,039
2903,62	115,852	-0,064	0,029
3276,31	114,296	-0,058	0,049

Tabel C. 4 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PA Murni

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
573,77	97,096	0,013	0,010
1032,96	98,444	0,007	0,015
1168,12	98,185	0,008	0,030
1197,86	97,938	0,009	0,036
1259,81	95,849	0,018	0,047
1370,32	99,089	0,004	0,057
1461,70	96,720	0,014	0,077
1533,59	89,400	0,049	0,109
1636,47	88,079	0,055	0,106
1923,46	112,150	-0,050	0,016
1954,74	112,246	-0,050	0,021
1973,57	110,498	-0,043	0,018
1980,78	109,651	-0,040	0,022
1992,87	112,687	-0,052	0,020
2014,24	112,716	-0,052	0,019
2027,11	112,662	-0,052	0,016
2042,98	112,328	-0,050	0,00
2049,61	112,446	-0,051	0,015
2066,57	113,348	-0,054	0,022
2077,08	112,657	-0,052	0,020
2110,02	112,878	-0,053	0,016
2132,65	113,399	-0,055	0,014
2146,24	113,239	-0,054	0,007
2162,33	109,149	-0,038	0,019
2173,71	113,741	-0,056	0,015
2182,13	112,497	-0,051	0,029

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
2191,18	111,065	-0,046	0,019
2209,60	113,930	-0,057	0,019
2223,72	112,403	-0,051	0,022
2235,30	113,392	-0,055	0,018
2297,19	113,301	-0,054	0,018
2323,17	113,386	-0,055	0,019
2860,76	102,787	-0,012	0,064
2931,59	97,183	0,012	0,090
3078,14	114,250	-0,058	0,034
3295,07	99,773	0,001	0,093

Tabel C. 5 Konversi dan Perbaikan Absorbansi Spektrum IR PA Setelah 360 Menit Waktu Kontak

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
568,22	97,247	0,012	0,013
1033,07	100,656	-0,003	0,017
1167,74	99,222	0,003	0,022
1260,24	97,854	0,009	0,033
1370,75	99,687	0,001	0,029
1462,50	96,278	0,016	0,049
1540,44	87,257	0,059	0,097
1636,58	85,511	0,068	0,118
1967,26	118,637	-0,074	0,017
1974,82	117,654	-0,071	0,022
1982,74	117,716	-0,071	0,023
1992,00	118,032	-0,072	0,023
2010,46	116,840	-0,068	0,029
2035,50	117,630	-0,071	0,030
2050,74	116,416	-0,066	0,036
2076,18	117,248	-0,069	0,036
2094,05	118,570	-0,074	0,033
2104,60	118,403	-0,073	0,035
2121,37	117,492	-0,070	0,041
2137,35	119,671	-0,078	0,035
2150,98	119,384	-0,077	0,036
2161,84	117,976	-0,072	0,044
2196,10	118,223	-0,073	0,047
2208,32	117,628	-0,071	0,049

Bilangan Gelombang Puncak (cm-1)	Intensitas (%T)	Intensitas (A)	Intensitas (A, dengan baseline)
2231,92	119,019	-0,076	0,043
2241,11	119,918	-0,079	0,039
2323,95	119,065	-0,076	0,039
2863,59	105,782	-0,024	0,081
2933,80	98,136	0,008	0,117
3083,99	119,468	-0,077	0,040
3294,55	101,832	-0,008	0,121

Dari data tersebut kemudian dapat dihitung nilai CI untuk setiap sampel. Berikut merupakan contoh perhitungan CI untuk PA murni,

$$\text{Absorbansi puncak pada } 1.850 - 1.650 \text{ cm}^{-1} = 0,338$$

$$\text{Absorbansi puncak pada } 1.500 - 1.420 \text{ cm}^{-1} = 0,050$$

$$\begin{aligned} \text{CI} &= \frac{0,338}{0,050} \\ &= 6,67 \end{aligned}$$

Nilai absorbansi puncak yang digunakan untuk perhitungan CI dan hasilnya secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel C.6.

Tabel C. 6 Nilai *Carbonyl Index*

Sampel	Absorbansi Puncak 1.850 – 1.650 cm ⁻¹	Absorbansi Puncak 1.500 – 1.420 cm ⁻¹	CI
PET Murni	0,338	0,050	6,67
PET Terolah	0,142	0,026	5,52
PA Murni	0,107	0,077	1,37
PA Terolah	0,118	0,049	2,41

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran D. Hasil Analisis GC-MS

Prosedur dan kondisi analisis GC-MS untuk sampel 0,5 mg/L PET dengan intensitas iradiasi 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ adalah sebagai berikut:

Cara kerja:

1. Sampel 2 mL dilarutkan DMSO p.a. 2 mL
2. Divortex 3 menit, disonifikasi selama 15 menit
3. Larutan sampel disaring dengan membran filter 0,45 μL
4. Filtrat diinjeksikan 1 μL di instrumen GC-MS

Kondisi GC:

Instrumen	: Agilent 6890N Network GC System dengan autosampler
Detektor	: Agilent 5973 inert MSD
Kolom	: J&W Scientific, HP-5MS, 0,25 mm x 30 m x 0,25 μm
Inlet	: split 1/100, 250°C
Oven	: terprogram; 50°C (5 menit) -> 10°C/menit -> 280°C (15 menit)
Flow dalam kolom	: 1 mL/menit (konstan)
Aux	: 250°C
MS Quad	: 150°C
MS Source	: 230°C
Scan mode	: 20-600 amu
Solvent delay	: 0 menit
Pustaka	: Wiley versi 8.0
Volume injeksi	: 1 μL

Tabel D. 1 Hasil GC-MS PET

RT	Nama Senyawa	Area	% Normalisasi	Qual
120 Menit Waktu Kontak				
1.33	Unknown	26427188	13.93%	86
1.49	(Methylsulfanyl) Methane	105614837	55.66%	95
2.76	Dimethyl Disulfide	40226345	21.20%	97
3.39	Unknown	5441450	2.87%	38
3.71	Unknown	910803	0.48%	47

RT	Nama Senyawa	Area	% Normalisasi	Qual
4.07	Unknown	1434772	0.76%	78
10.38	Dimetoxysulfone	9690068	5.11%	98
	Total	189745463		
360 Menit Waktu Kontak				
1.35	Unknown	11928767	8.99%	80
1.5	(Methylsulfanyl) Methane	48353403	36.44%	95
2.78	Methyl disulfide	19058979	14.36%	97
8.73	Unknown	3563735	2.69%	27
10.39	Dimethoxysulfone	4479420	3.38%	98
18.66	Unknown	-2407011	-1.81%	60
20.49	Unknown	12337289	9.30%	55
21.06	Unknown	5710709	4.30%	48
21.19	Unknown	1033775	0.78%	59
21.43	Unknown	1400711	1.06%	56
24.64	Unknown	1696187	1.28%	38
25.59	Tetracosane	2757917	2.08%	98
25.84	Unknown	1308715	0.99%	43
26.41	Icosane	2233289	1.68%	98
26.85	Phthalic acid, mono-(2-ethylhexyl) ester	3907488	2.94%	90
27.18	Hexacosane	1696890	1.28%	98
27.93	Unknown	4146447	3.12%	89
28.69	Eicosane	2690203	2.03%	95
29.58	Unknown	1885635	1.42%	52
32.03	Unknown	4919607	3.71%	22
	Total	132702155		

Perlakuan yang diterapkan pada sampel PA juga serupa, hanya berbeda pada pelarut yang digunakan yaitu DMF.

Tabel D. 2 Hasil GC-MS PA

RT	Nama Senyawa	Area	% Normalisasi	Qual
120 Menit Waktu Kontak				
1.32	Oxosulfane Oxide	37522968	52.11%	90
1.45	Unknown	26613785	36.96%	59
1.97	Unknown	1095893	1.52%	86
2.62	Unknown	3670268	5.10%	78
2.8	Unknown	1444184	2.01%	72
8.88	Unknown	1659850	2.31%	72

RT	Nama Senyawa	Area	% Normalisasi	Qual
	Total	72006948		
360 Menit Waktu Kontak				
1.31	Sulfurous anhydride	27779771	33.16%	90
1.41	Unknown	21856241	26.09%	70
1.64	Unknown	3587175	4.28%	80
1.82	Unknown	1532895	1.83%	74
2.02	Unknown	622845	0.74%	59
2.12	Unknown	987474	1.18%	56
2.67	Unknown	610770	0.73%	50
2.75	Unknown	3051050	3.64%	9
4.76	Unknown	5130985	6.12%	38
5.03	Unknown	4514601	5.39%	50
5.33	Unknown	9742129	11.63%	49
6.04	Unknown	1741753	2.08%	35
8.88	Unknown	2104611	2.51%	80
11.81	Unknown	511075	0.61%	64
	Total	83773375		

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran E. Hasil Analisis Statistik

Uji *two-way* ANOVA dilakukan menggunakan fitur Optimal Custom Design dalam aplikasi Design-Expert 13. Data yang dimasukkan ditunjukkan pada Tabel E.1 hingga Tabel E.4.

Tabel E. 1 Data Kelompok 0,1 mg/L PET

Run	Intensitas Iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Waktu (menit)	COD _t /COD ₀
1	189	0	1
2	169	0	1
3	30	0	1
4	189	360	3,53
5	30	360	2,47
6	30	0	1
7	169	0	1
8	169	240	1
9	30	0	1
10	169	360	1,54
11	189	360	3,53
12	169	240	1
13	30	240	2,31
14	189	0	1
15	169	240	1
16	189	240	3,2

Tabel E. 2 Data Kelompok 0,5 mg/L PET

Run	Intensitas Iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Waktu (menit)	COD _t /COD ₀
1	30	0	1
2	169	240	0,84
3	30	0	1
4	189	240	2,31
5	189	0	1
6	189	360	2,43
7	30	360	1,95
8	169	0	1
9	169	0	1
10	30	240	1,23
11	189	0	1
12	169	240	0,84
13	169	240	0,84

Run	Intensitas Iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Waktu (menit)	COD _t /COD ₀
14	169	360	1,08
15	169	0	1
16	30	240	1,23

Tabel E. 3 Data Kelompok 0,1 mg/L PA

Run	Intensitas Iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Waktu (menit)	COD _t /COD ₀
1	189	360	1,55
2	169	240	7,34
3	169	240	7,34
4	30	360	4,89
5	189	240	12,87
6	169	0	1
7	30	0	1
8	30	240	3,6
9	189	360	1,55
10	189	0	1
11	30	0	1
12	30	0	1
13	169	240	7,34
14	169	360	8,07
15	169	0	1
16	189	0	1

Tabel E. 4 Data Kelompok 0,5 mg/L PA

Run	Intensitas Iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Waktu (menit)	COD _t /COD ₀
1	189	0	1
2	169	360	0,88
3	189	360	2,9
4	169	0	1
5	189	360	2,9
6	169	0	1
7	30	0	1
8	169	240	1,07
9	169	240	1,07
10	30	0	1
11	169	240	1,07
12	169	360	0,88
13	189	0	1

Run	Intensitas Iradiasi UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Waktu (menit)	COD _t /COD ₀
14	189	240	2,33
15	30	240	1,31
16	30	360	1,37

Selanjutnya ada pula hasil uji *two-way* ANOVA ditunjukkan pada Tabel E.5 hingga Tabel E.8.

Tabel E. 5 Hasil Uji *Two-Way* ANOVA Kelompok 0,1 mg/L PET

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	12.06	5	2.41	8.77	0.0020	significant
A-UV Intensity	0.8105	1	0.8105	2.95	0.1168	
B-Time	5.64	1	5.64	20.51	0.0011	
AB	0.0250	1	0.0250	0.0908	0.7693	
A ²	4.04	1	4.04	14.68	0.0033	
B ²	0.0298	1	0.0298	0.1085	0.7486	
Residual	2.75	10	0.2750			
Lack of Fit	2.75	3	0.9167			
Pure Error	0.0000	7	0.0000			
Cor Total	14.81	15				

Tabel E. 6 Hasil Uji *Two-Way* ANOVA Kelompok 0,5 mg/L PET

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2.68	5	0.5352	4.12	0.0271	significant
A-UV Intensity	0.3623	1	0.3623	2.79	0.1257	
B-Time	1.13	1	1.13	8.71	0.0145	
AB	0.0006	1	0.0006	0.0045	0.9481	
A ²	1.26	1	1.26	9.70	0.0110	
B ²	0.1551	1	0.1551	1.19	0.3000	
Residual	1.30	10	0.1298			
Lack of Fit	1.30	3	0.4326			
Pure Error	0.0000	7	0.0000			
Cor Total	3.97	15				

Tabel E. 7 Hasil Uji *Two-Way* ANOVA Kelompok 0,1 mg/L PA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	135.07	5	27.01	3.90	0.0319	significant
A-UV Intensity	1.39	1	1.39	0.2003	0.6640	
B-Time	17.71	1	17.71	2.56	0.1408	
AB	0.2147	1	0.2147	0.0310	0.8637	
A ²	1.09	1	1.09	0.1572	0.7001	
B ²	54.42	1	54.42	7.86	0.0187	
Residual	69.22	10	6.92			
Lack of Fit	69.22	3	23.07			

Pure Error	0.0000	7	0.0000			
Cor Total	204.29	15				

Tabel E. 8 Hasil Uji *Two-Way* ANOVA Kelompok 0,5 mg/L PA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	5.28	5	1.06	5.55	0.0105	significant
A-UV Intensity	1.42	1	1.42	7.48	0.0210	
B-Time	0.7961	1	0.7961	4.19	0.0679	
AB	0.3218	1	0.3218	1.69	0.2223	
A ²	3.02	1	3.02	15.90	0.0026	
B ²	0.0150	1	0.0150	0.0790	0.7844	
Residual	1.90	10	0.1900			
Lack of Fit	1.90	3	0.6335			
Pure Error	0.0000	7	0.0000			
Cor Total	7.18	15				

Selanjutnya untuk pengujian menggunakan metode Friedman dibantu dengan menggunakan aplikasi Microsoft Excel dengan prosedur sebagai berikut:

1. Memasukkan data yang menunjukkan rasio COD_t/COD₀ setiap 120 menit untuk variasi jenis polimer yang digunakan (Tabel D.9 hingga Tabel D.14) dan variasi konsentrasi serat mikroplastik (Tabel D.15 hingga Tabel D.20).
2. Mengurutkan data di setiap barisnya menggunakan fungsi =RANK.AVG(...) dan selanjutnya menjumlah hasil pengurutan setiap variasi. Jumlah tersebut kemudian dikuadratkan dan hasilnya dijumlah.
3. Menghitung tes statistik dan nilai p. Rumus tes statistik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{12}{nk(k+1)} \sum R_j^2 - 3n(k+1)$$

Dengan:

n = jumlah baris

k = jumlah kolom

R_j = jumlah urutan kelompok ke j

Di bawah hipotesis nol, nilai Q mengikuti distribusi *chi-square* dengan derajat kebebasan k-1. Nilai p ditemukan dengan menggunakan fungsi =CHISQ.DIST.RT(Q,k-1)

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk mengetahui pengaruh jenis polimer yang digunakan terhadap degradasi serat mikroplastik dengan menggunakan data kelompok 0,1 mg/L menggunakan intensitas iradiasi 30 μW/cm² yang ditunjukkan pada Tabel E.9.

Tabel E. 9 Data Kelompok 0,1 mg/L 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Jenis Polimer		Pengurutan	
	PET	PA	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	1,16	2,60	1	2
240	2,31	3,60	1	2
360	2,47	4,89	1	2

$$n = 4$$

$$k = 2$$

$$R_{\text{PET}}^2 = (1,5+1+1+1)^2$$

$$= 20,25$$

$$R_{\text{PA}}^2 = (1,5+2+2+2)^2$$

$$= 56,25$$

$$\Sigma R_j^2 = 20,25 + 56,25$$

$$= 76,50$$

$$Q = \frac{12}{4 \cdot 2(2+1)} (76,50) - 3 \cdot 4(2 + 1)$$

$$= 2,25$$

$$\text{Nilai } p = 0,134$$

Dengan menggunakan cara yang sama kemudian dapat dihitung nilai p untuk semua kelompok data yang ditunjukkan pada Tabel E.10 hingga Tabel E.14.

Tabel E. 10 Data Kelompok 0,1 mg/L 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Jenis Polimer		Pengurutan	
	PET	PA	PET	PA
0	1.00	1.00	1,5	1,5
120	0.86	4.90	1	2
240	1.00	7.34	1	2
360	1.54	8.07	1	2
n				4
k				2
R_{PET}^2				20,25
R_{PA}^2				56,25
ΣR_j^2				76,50
Q				2,25

Nilai p	0,134
---------	-------

Tabel E. 11 Data Kelompok 0,1 mg/L 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Jenis Polimer		Pengurutan	
	PET	PA	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
240	3,20	12,87	1	2
360	3,53	1,55	2	1
n				3
k				2
R_{PET}^2				20,25
R_{PA}^2				20,25
ΣR_j^2				40,50
Q				0
Nilai p				1

Tabel E. 12 Data Kelompok 0,5 mg/L 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Jenis Polimer		Pengurutan	
	PET	PA	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	1,14	0,81	2	1
240	1,23	1,31	1	2
360	1,95	1,37	2	1
n				4
k				2
R_{PET}^2				42,25
R_{PA}^2				30,25
ΣR_j^2				72,50
Q				0,25
Nilai p				0,617

Tabel E. 13 Data Kelompok 0,5 mg/L 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Jenis Polimer		Pengurutan	
	PET	PA	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	0,87	1,50	1	2
240	0,84	1,07	1	2
360	1,08	0,88	2	1
n				4
k				2
R_{PET}^2				30,25

R_{PA}^2	42,25
ΣR_j^2	72,50
Q	0,25
Nilai p	0,617

Tabel E. 14 Data Kelompok 0,5 mg/L 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Jenis Polimer		Pengurutan	
	PET	PA	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	1,16	1,76	1	2
240	2,31	2,33	1	2
360	2,43	2,90	1	2
n				4
k				2
R_{PET}^2				20,25
R_{PA}^2				56,25
ΣR_j^2				76,50
Q				2,25
Nilai p				0,134

Cara yang sama juga diterapkan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi serat mikroplastik terhadap degradasinya. Data kelompok yang digunakan serta hasil nilai p yang didapat ditunjukkan pada Tabel E.15 hingga Tabel E.20.

Tabel E. 15 Data Kelompok PET 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Konsentrasi MP (mg/L)		Pengurutan	
	0,1	0,5	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	1,16	1,14	2	1
240	2,31	1,23	2	1
360	2,47	1,95	2	1
n				4
k				2
R_{PET}^2				56,25
R_{PA}^2				20,25
ΣR_j^2				76,50
Q				2,25
Nilai p				0,134

Tabel E. 16 Data Kelompok PET 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Konsentrasi MP (mg/L)		Pengurutan	
	0,1	0,5	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	0,86	0,87	1	2
240	1,00	0,84	2	1
360	1,54	1,08	2	1
n				4
k				2
R_{PET}^2				42,25
R_{PA}^2				30,25
ΣR_j^2				72,50
Q				0,25
Nilai p				0,617

Tabel E. 17 Data Kelompok PET 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Konsentrasi MP (mg/L)		Pengurutan	
	0,1	0,5	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	0,67	1,16	1	2
240	3,20	2,31	2	1
360	3,53	2,43	2	1
n				4
k				2
R_{PET}^2				42,25
R_{PA}^2				30,25
ΣR_j^2				72,50
Q				0,25
Nilai p				0,617

Tabel E. 18 Data Kelompok PA 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Konsentrasi MP (mg/L)		Pengurutan	
	0,1	0,5	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	2,60	0,81	2	1
240	3,60	1,31	2	1
360	4,89	1,37	2	1

n	4
k	2
R_{PET}^2	56,25
R_{PA}^2	20,25
ΣR_j^2	76,50
Q	2,25
Nilai p	0,134

Tabel E. 19 Data Kelompok PA 169 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Konsentrasi MP (mg/L)		Pengurutan	
	0,1	0,5	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
120	4,90	1,50	2	1
240	7,34	1,07	2	1
360	8,07	0,88	2	1
n				4
k				2
R_{PET}^2				56,25
R_{PA}^2				20,25
ΣR_j^2				76,50
Q				2,25
Nilai p				0,134

Tabel E. 20 Data Kelompok PA 189 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Waktu	Konsentrasi MP (mg/L)		Pengurutan	
	0,1	0,5	PET	PA
0	1,00	1,00	1,5	1,5
240	12,87	2,33	2	1
360	1,55	2,90	1	2
n				3
k				2
R_{PET}^2				20,25
R_{PA}^2				20,25
ΣR_j^2				40,50
Q				0
Nilai p				1

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran F. Dokumentasi Penelitian



Gambar F. 1 Pembuatan Sampel Buatan



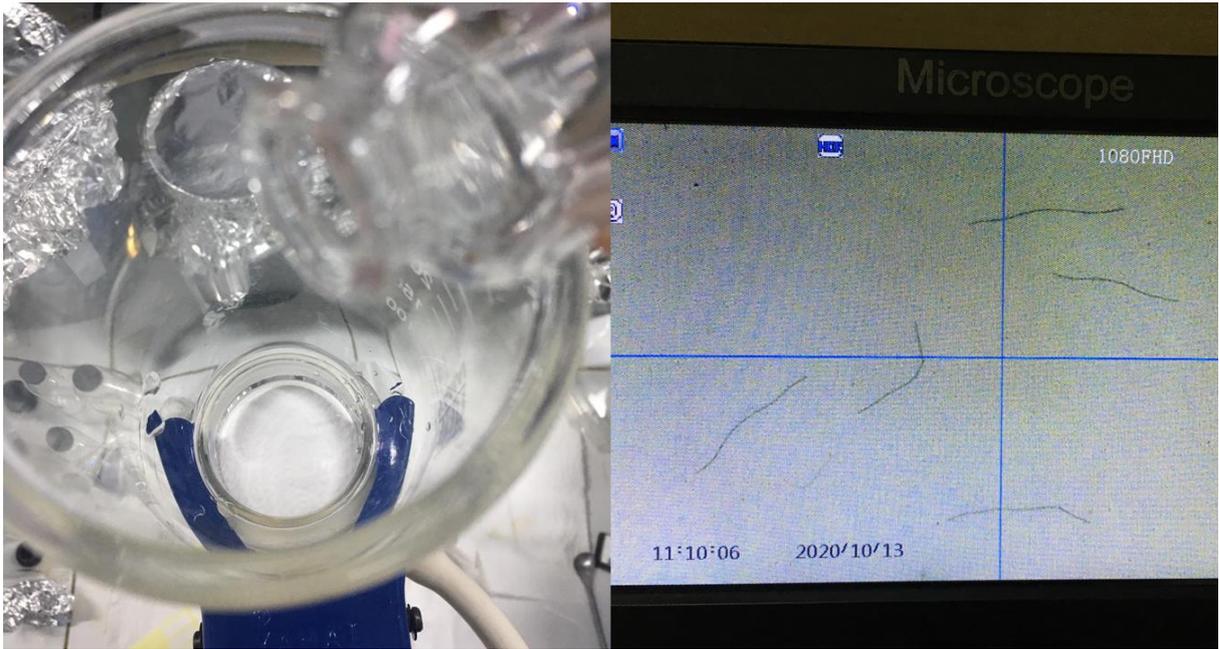
Gambar F. 2 Pengukuran Kekeruhan



Gambar F. 3 Pengukuran TSS



Gambar F. 4 Operasi AOP dan Pengawetan Sampel



Gambar F. 5 Analisis Mikroplastik menggunakan Mikroskop



Gambar F. 6 Analisis COD Metode *Closed Reflux*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Iftinan Najma Sadida lahir di Surabaya pada tanggal 7 Mei 2000. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Al-Falah Surabaya (2006-2012), SMP Negeri 1 Surabaya (2012-2015), dan SMA Negeri 2 Surabaya (2015-2018). Pada tahun 2018, penulis melanjutkan Pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan (FTSPK) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 03211840000014.

Selain aktif mengikuti pembelajaran, penulis juga aktif dalam kegiatan non akademik selama masa perkuliahan. Pada tahun 2019, penulis pernah menjadi salah satu pengurus divisi Paper Competition dalam kegiatan PETROLIDA 2020. Selain itu penulis juga pernah aktif dalam organisasi. Pada tahun 2020, penulis pernah menjadi bagian dari *Event Department* dalam ITS MUN Club. Di tahun yang sama, penulis juga menjabat sebagai asisten sekretaris jenderal Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) kemudian menjabat sebagai direktur internal di tahun berikutnya.

Apabila pembaca ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini serta memberikan kritik dan saran, penulis dapat dihubungi melalui email berikut: iftisadi@gmail.com.



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Iftinan Najma Sadida
NRP : 0321184000014
Judul : Efektivitas *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Menggunakan Sistem O₃/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	15/01/22	Metodologi penelitian meliputi sketsa reaktor AOP	
2	21/01/22	Metode penelitian meliputi variabel yang akan digunakan	
3	01/02/22	Perbaikan PPT proposal	
4	15/02/22	Revisi proposal	
5	02/04/22	Perubahan variabel dan penambahan waktu kontak AOP	
6	10/05/22	Konversi data COD menjadi rasio dan analisis statistik serta penambahan untuk uji FTIR	
7	12/05/22	Analisis statistik menggunakan Design Expert 13	
8	06/06/22	Hasil FTIR	
9	23/06/22	Draft laporan akhir	
10	24/06/22	Penyelesaian laporan akhir	



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5920387

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

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

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

Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 10.30 - 11.45 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Efektivitas *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) Menggunakan Sistem O_3/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air

Nilai TOEFL 540

Nama : Iftinan Najma Sadida
NRP. : 03211840000014
Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1.	Kesimpulan tentang poin, berdasarkan data
2.	Persamaan $f(t, I) \rightarrow$ bisa muncul ?

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

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

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

Dosen Pembimbing

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



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

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

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

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

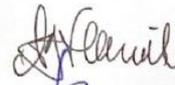
Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 10 30 - 11 45 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Efektivitas Advanced Oxidation Processes (AOPs) Menggunakan Sistem O₃/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air
Nama : Iftinan Najma Sadida
NRP. : 0321184000014
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Saran untuk penelitian lanjutan diformulasikan dengan lain untuk mencari pada konsentrasi O ₃ lebih tinggi; juga Intensitas yg lebih tinggi

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

Dosen Penguji Dr. Ir. Agus Slemet, MSc

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


()



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

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

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

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

Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 10.30 - 11.45 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Efektivitas Advanced Oxidation Processes (AOPs) Menggunakan Sistem O3/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air
Nama : Iftinan Najma Sadida
NRP. : 0321184000014
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	Selamat dan Sukses!

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

Dosen Penguji Dr. Ali Masduq, ST., MT

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



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

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

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

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

Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 10.30 - 11.45 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Efektivitas Advanced Oxidation Processes (AOPs) Menggunakan Sistem O₃/UV untuk Degradasi Serat Mikroplastik dalam Air
Nama : Iftina Najma Sadida
NRP. : 0321184000014
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	ditambahkan tinjauan pustaka mengenai analisis statistik.
2	Ditambahkan sumber gambar.
3	Ditambahkan penjelasan setiap grafik
4	Memperbaiki referensi yang digunakan dalam pembahasan (digunakan yang relevan).

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

Dosen Penguji Ainul Firdatun Nisaa, ST, MSc

()

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

()