

DEGRADASI LIMBAH BATIK DENGAN TEKNOLOGI *MULTIBUBBLE-OZONE* YANG DIHASILKAN PLASMA *CORONA*

(Skripsi)

Oleh

**ZULVIKAR. M
NPM 2117041038**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

DEGRADASI LIMBAH BATIK DENGAN TEKNOLOGI *MULTIBUBBLE-OZONE* YANG DIHASILKAN PLASMA CORONA

Oleh

ZULVIKAR. M

Limbah cair industri batik mengandung zat warna sintetis, senyawa organik kompleks, dan ion terlarut yang berpotensi mencemari perairan sehingga diperlukan metode pengolahan yang efektif. Penelitian ini bertujuan menganalisis prinsip kerja dan efektivitas teknologi *multibubble-ozone* berbasis plasma corona dalam mendegradasi limbah batik berdasarkan perubahan parameter kualitas air. Sistem menggunakan alat plasma corona bertegangan tinggi sebagai penghasil ozon yang didispersikan melalui difuser *multibubble-ozone* yang gabungan dari gelembung mikro dan makro guna meningkatkan efisiensi transfer massa dan pembentukan spesies oksidator reaktif. Perlakuan dilakukan selama 60 menit dengan interval 10 menit menggunakan campuran 500 ml limbah batik dan 500 ml aquades. Hasil menunjukkan penurunan absorbansi dari 0,13500 menjadi 0,01700 dengan efisiensi degradasi 87,41%. Nilai TDS menurun dari 1089 mg/L menjadi 611 mg/L, DHL dari 1425 $\mu\text{S}/\text{cm}$ menjadi 908 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan DO meningkat dari 4,48 mg/L menjadi 5,90 mg/L, dengan perubahan suhu relatif kecil dari 23,4 °C menjadi 22,6 °C. Data UV-Vis pada panjang gelombang 519 nm menunjukkan penurunan absorbansi seiring waktu kontak, yang mengindikasikan potensi sistem *multibubble-ozone* berbasis plasma corona dalam mendegradasi zat warna batik dan menurunkan kandungan polutan berwarna.

Kata kunci: Kualitas Air, Limbah Batik, *Multibubble-ozone*, Plasma Corona

ABSTRACT

DEGRADATION OF BATIK WASTEWATER USING MULTIBUBBLE– OZONE TECHNOLOGY GENERATED BY CORONA PLASMA

By

ZULVIKAR. M

Batik industrial wastewater contains synthetic dyes, complex organic compounds, and dissolved ions that may contaminate aquatic environments, thereby requiring an effective treatment method. This study aims to analyze the working principle and effectiveness of multibubble-ozone technology based on corona plasma in degrading batik wastewater, as evaluated through changes in water quality parameters. The system employed a high-voltage corona plasma device to generate ozone, which was dispersed through a multibubble-ozone difuser consisting of micro- and macrobubbles to enhance mass transfer efficiency and promote the formation of reactive oxidizing species. The treatment was conducted for 60 minutes with 10-minute sampling intervals using a mixture of 500 mL batik wastewater and 500 mL distilled water. The results showed a decrease in absorbance from 0.13500 to 0.01700, corresponding to a degradation efficiency of 87.41%. TDS decreased from 1089 mg/L to 611 mg/L, EC from 1425 μ S/cm to 908 μ S/cm, and DO increased from 4.48 mg/L to 5.90 mg/L, with only a slight temperature change from 23.4 °C to 22.6 °C. UV-Vis data at 519 nm indicated a consistent decline in absorbance with increasing contact time, suggesting the potential of the multibubble–ozone corona plasma system in degrading batik dyes and reducing colored pollutants.

Keywords: *Batik Wastewater, Corona Plasma, Multibubble–ozone, Water Quality*

Judul Skripsi : Degradasi Limbah Batik dengan Teknologi *Multibubble-ozone* yang Dihasilkan Plasma Corona

Nama Mahasiswa : **Zulvikar. M**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041038

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam


MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II


Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si.
NIP. 196107231986031003


Ahmad Faruq Abdurrahman, M.Si.
NIP. 199702072024061001

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA


Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.
NIP. 199011252019032018

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

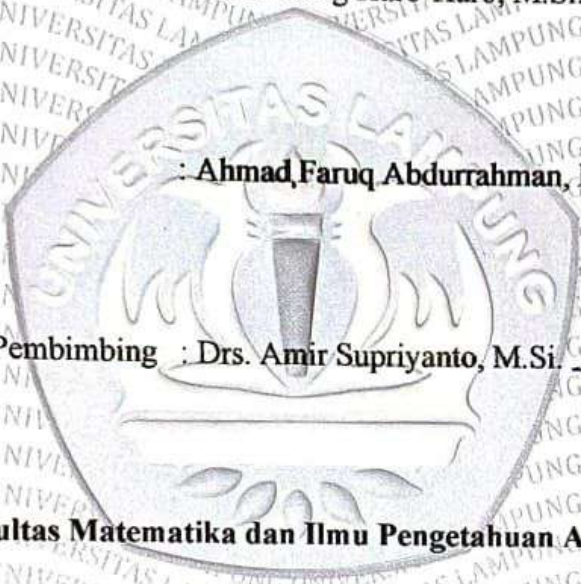
: Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si.

Sekretaris

: Ahmad Faruq Abdurrahman, M.Si.

Penguji Bukan Pembimbing

: Drs. Amir Supriyanto, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Drs. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 30 Maret 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi yang berjudul “Degradasi Limbah Batik dengan Teknologi *Multibubble-ozone* yang dihasilkan Plasma *Corona*” tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil plagiasi, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan dan peraturan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandar Lampung, 01 April 2026



Zulvikar. M
NPM 2117041038

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Zulfikar yang lahir dari buah cinta oleh Ibu Nuraenah dan Bapak Marja'i pada hari Jumat, 20 September 2002 di Kampung Duren, Kelurahan Sukamaju, Kecamatan Teluk Betung Timur, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung dan masih menetap di tanah kelahiran. Penulis memiliki seorang adik bernama Murtado. Sekedar informasi perihal penamaan penulis yang salah kaprah, seringkali dijumpai dan digunakan guna kepentingan administrasi adalah Zulvikar. M karena mengikuti Kartu Keluarga (KK) yang hampir seluruh anggota keluarga penulis mengalami kesalahan nama dan tanggal lahir. Hal ini disebabkan pada masa pembuatan Kartu Keluarga (KK) mengikuti program pemerintah setempat yang menyatakan seluruh pelayanan dokumen kependudukan, termasuk Kartu Keluarga (KK) dan Akte Kelahiran digratiskan di tahun 2010. Akibat pendataan warga yang sangat menumpuk, keluarga penulis menjadi korban pendataan yang tidak akurat. Orang tua penulis yang saat itu tidak mengerti apa-apa dan tidak tahu bahwasanya itu dapat berdampak di masa yang akan datang. Benar saja, penulis mengalami kesulitan tiap kali menulis administrasi di sekolah, layanan umum, dan lain-lain. Pernah sekali waktu tahun 2018, penulis yang mulai memahami masalah ini pun mengurus perbaikan data administrasi penulis. Sayangnya perbaikan data itu harus melalui proses yang sangat kompleks dan memerlukan biaya transportasi umum guna bolak-balik ke berbagai dinas terkait, juga kepentingan berkas, dan sebagainya. Untuk itulah, penulis tetap menggunakan nama Zulvikar. M sebagai data kependudukan dan menerimanya dengan seksama. Penulis berencana memperbaiki data kependudukannya setelah finansial sudah cukup.

Menelusuri riwayat pendidikan penulis, ia pernah menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 1 Sukamaju pada tahun 2009-2015, kemudian melanjutkan pendidikan

menengah di SMP Negeri 27 Bandar Lampung pada tahun 2015-2018 dan SMA Negeri 11 Bandar Lampung pada tahun 2018-2021. Mulai dari tahun 2021, penulis resmi menjadi mahasiswa Program Studi S1 Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Sejak SMA, penulis mengikuti ekstrakurikuler teater bernama Teater Sebelas yang telah menjadikan penulis sebagai siswa yang berprestasi tak hanya dalam bidang akademik, tapi juga bidang non-akademik terutama seni teater. Salah dua prestasi paling bergengsi saat SMA adalah saat menjadi Juara 3 FLS2N Cabang Monolog Tingkat Bandar Lampung pada tahun 2019 dan Juara 1 Film Pendek FLS2N Tingkat Provinsi Lampung tahun 2020, yang membawa penulis menjadi peserta nasional di perlombaan yang sama. Semangat lomba dan prestasi ini terus disalurkan penulis selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung. Pada tahun 2020, penulis meraih Juara 1 Festival Teater bagi Generasi Muda se-Provinsi Lampung. Di tahun yang sama pula penulis mendapat predikat “Mahasiswa Berprestasi” tingkat fakultas dengan raihan nilai tertinggi. Di tahun 2022, penulis mengikuti organisasi kemahasiswaan sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) dan staf ahli Dinas Advokasi dan Kesejahteraan Mahasiswa (Adkesma). Penulis juga pernah menjadi Koordinator Publikasi, Desain, dan Dokumentasi (PDD) pada dua kegiatan tingkat fakultas, yakni Pengenalan Kehidupan Kampus Mahasiswa Baru Fakultas (PKKMB F) dan Karya Wisata Ilmiah (KWI) ke-XXXIII. Di tahun 2023, penulis menjabat sebagai Ketua Bidang Minat dan Bakat HIMAFI Periode 2023 dan juga diamanahkan sebagai Koordinator Divisi Acara Musyawarah Nasional ke-17 Ikatan Himpunan Mahasiswa Fisika Indonesia (IHAMAFI). Penulis juga pernah menulis naskah lakon berjudul “AKI: Aku Kenangan Idrus” yang diterbitkan bersama 7 penulis lain dalam kumpulan lakon “8 Kisah Panggung Fiksi Sejarah” oleh Teater Satu Lampung dan Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi tahun 2023. Naskah lakon penulis telah dipentaskan sebanyak dua kali di tahun 2023 oleh Teater Satu dan Festival Biofiksi satu tahun setelahnya yang dipentaskan Teater Sebelas.

Memasuki Januari 2024, penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. Suma Briket Premium, Kecamatan Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Penelitian yang dilakukan penulis selama PKL berjudul “Analisis Perbandingan Briket Tempurung Kelapa Pada Tungku Pemanasan Oven Satu dan Oven Dua dengan Menggunakan Metode Quality Testing di PT. Suma Briket Premium”. Beberapa bulan berselang, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Negeri Katon, Kecamatan Marga Tiga, Kabupaten Lampung Timur, Provinsi Lampung. Di tahun yang sama, penulis menjabat sebagai Ketua Dinas Media dan Informasi (Medinfo) BEM FMIPA Unila Periode 2024 dan penulis juga meraih Juara 3 Film Pendek Berbahasa Lampung Semarak Bahasa dan Sastra Tingkat Provinsi Lampung. Pada tahun 2025, penulis menjadi bagian dalam artikel jurnal pengabdian dengan judul “Dampak Sosialisasi Peluang Karir Fisika: Meningkatkan Siswa SMA Terhadap Jurusan Fisika FMIPA” yang diterbitkan oleh JP2T Universitas Malang. Penulis juga meraih Juara Penulisan Naskah Lakon Sayembara Sastra Tingkat Nasional di Universitas Sriwijaya tahun 2025.

Sepanjang masa studi kuliah, penulis selalu aktif dalam menulis naskah lakon, cerpen, dan esai. Terhitung penulis sudah melahirkan karya tulis sedikitnya 20 judul dalam rentang waktu tersebut. Penulis telah mementaskan belasan naskah lakon karya sendiri dan/atau karya penulis ternama dalam pertunjukan teater sebagai sutradara, aktor, atau tim artistik baik dalam skala daerah (kota/provinsi), maupun nasional. Penulis memiliki nama pena dan nama panggung Zulfikar Mzimal.

MOTTO

“Qui sine praeparatione ascendit in rostrum, sine honore descendit.”

(Marcus Tullius Cicero – Filsuf)

“Love the art in yourself, not yourself in the art.”

(Konstantin Stanislavski – Bapak Teater Dunia)

“To every problem, there is a most simple solution.”

(Agatha Christie – Ratu Penulis Cerita Fiksi Kriminal)

“Two roads diverged in a wood, and I—I took the one less traveled by, And that has made all the difference.”

(Robert Frost – Penyair)

“Bahwa segala yang baik akan berbiak.”

(Joko Pinurbo – Penyair)

“Hidup itu singkat, kesepian kita yang panjang.”

(Iswadi Pratama – Seniman)

“Takkan menjadi luar biasa, jika jalan yang kau tempuh biasa-biasa saja.”

(Zulfikar Mzimal)

“Goals never come easy. No one gives you goals.”

(Frank Lampard – Legenda Chelsea)

#Keep The Blue Flag Flying High

#Up The Chels

#Once a Blue is Always Blue

#London is Blue

CHELSEA FOOTBALL CLUB

PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Swt. yang telah memberikan kesehatan, kekuatan, dan kelancaran sehingga penelitian ini dapat diselesaikan. Karya ini penulis persembahkan

Kepada kedua orang tua tercinta

Ibu Nuraenah & Bapak Marja'i

Yang senantiasa memberikan doa, dukungan, pengorbanan, serta kasih sayang yang tiada henti.

Selain itu, skripsi ini penulis persembahkan kepada almamater tercinta

Universitas Lampung

Sebagai tempat penulis menimba ilmu dan pengalaman.

Tidak lupa, karya ini juga penulis persembahkan kepada

Diri Sendiri

Yang telah berjuang, bertahan, dan tidak menyerah dalam menghadapi berbagai proses hingga skripsi ini dapat terselesaikan.

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat dan karunia Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si., selaku Dosen Pembimbing I, yang telah menerima penulis dengan peduli dan membimbing dengan penuh sabar serta memberikan arahan, saran, motivasi, semangat, juga dukungan selama proses penelitian dan penyusunan skripsi kepada penulis.
2. Bapak Ahmad Faruq Abdurrahman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah menjadi dosen panutan dan memberikan semangat muda yang bergelora dalam memberikan arahan, bimbingan, masukan, dan kepeduliannya kepada penulis selama pelaksanaan penelitian serta penyusunan skripsi.
3. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si., selaku Dosen Penguji, yang telah memberikan kritik, saran, dan arahan selama proses penyusunan skripsi kepada penulis.
4. Ibu Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik, yang telah memotivasi dan memberikan arahan dan bimbingannya selama penulis menempuh dunia perkuliahan.
5. Seluruh Dosen dan Staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung atas ilmu pengetahuan, pengalaman, dan bimbingan yang diberikan selama masa perkuliahan. Khususnya Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., dan Bapak Badriyadi.
6. Orang tuaku tercinta, Ibu Nuraenah dan Bapak Marja'i, yang senantiasa memberikan cinta, menyemaikan doa, dan dukungannya kepada penulis untuk tetap meneruskan pendidikan tingkat universitas dengan mengorbankan tenaga

dan pikiran serta tentunya uang yang tidak sedikit untuk segala keperluan penulis selalu kalian usahakan, sehingga penulis bisa berada di tahap ini dengan mengingat masa-masa awal pernah pesimis bahwa penulis tidak mungkin bisa jadi seorang sarjana, kalian yang berhasil membuktikan impian ini menjadi nyata dengan menaruh kepercayaan kepada penulis dan kalian selalu mengusahakan apapun untuk penulis.

7. Adikku terkasih, Murtado, yang seringkali berisik bersama penulis di rumah, sehingga membuat orang tua menggelengkan kepala, tetapi perlu diketahui cinta dan kepedulian penulis tiada henti untukmu.
8. Seluruh keluarga besar penulis, yang jumlahnya tiada tara, begitu pula ungkapan cinta dan syukur ini dianugerahi berkeluarga dengan kalian.
9. Safira Berliananda Budi, seorang terkasih, yang telah semangat, bantuan, dan dukungan penuh cinta selama kenal dengan penulis, terutama dalam proses penyusunan skripsi.
10. Teman-teman Pimpinan HIMAFI Periode 2023 a.k.a *Warrior Club*, yaitu Safira Berliananda Budi, Galipat Wijaya, Brilliant Naufal Farros, Bagas Pangestu, Avino Arya Buchan, Dias Aditya Syahputra, Nur Fajar Sidik, Fathan Khanifadin, Alissa Anggis, Yesha Argeta, Tri Aprilia, Etyka Dwi Mayang Sari, Eli Ratna Wati, Melisa Bitha, Sabrina Adinda Putri Wahyudi, Dina Afrilia, Siti Nina Karnia, dan Haikal Jamil, yang telah melewati masa-masa bersama selama kuliah.
11. Teman-teman, kakak-kakak, adik-adik Teater Sebelas, yang telah penulis anggap sebagai rumah kedua dalam berkarya dan mengajari artinya kekeluargaan, sehingga bersama-sama terus produktif berkesenian, terutama Kak Imam Setia Hagi, Bang Bucek Setiawan, Mbak Nabila Utami, Kak Dede Haryansyah, Sahrul Efendi, Fedri Andriansyah, Ahmad Sugandi, Sanwani, Dila Ayuni, dan Elfrada Parlindungan Napitupulu.
12. Teman-teman Pimpinan Kabinet Gawi Aksara BEM FMIPA Unila Periode 2024, yang telah memberikan ruang berbagai ide dan semangat berorganisasi selama perkuliahan.

13. Para murid *master of ceremony* penulis, yaitu Dwi Aprilia Rahmawati, Ayu Sinta Wati, Nurul Fitri Isnaini, Yeoanda Furi Bermami, Tuti Herdian Lestari, Aprilia Habibah, Gita Lestari, dan lain-lain.
14. Bang Sahrul, yang telah membantu penulis dan mendukung dengan penuh motivasi dan semangat.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	2
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian.....	6
1.4. Manfaat Penelitian.....	6
1.5. Batasan Masalah.....	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Industri Batik.....	8
2.2 Limbah Batik.....	11
2.3 Plasma <i>Corona</i>	14
2.4 Ozon	18
2.5 Gelembung Mikro	20
2.6 Parameter Kualitas Air Limbah	22
2.6.1 Absorbansi	22
2.6.2 Oksigen Terlarut	25
2.6.3 <i>Total Dissolved Solids</i> (TDS)	27
2.6.4 Daya Hantar Listrik.....	28
2.6.5 Suhu	29

III. METODE PENELITIAN

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	30
3.2	Alat dan Bahan	30
3.3	Prosedur Penelitian.....	31
3.3.1	Persiapan Penelitian	31
3.3.2	Pelaksanaan Perlakuan Limbah dengan Plasma <i>Corona</i>	32
3.3.3	Pengukuran Parameter Kualitas Air Limbah	34
3.3.3.1	Pengukuran Absorbansi Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	35
3.3.3.2	Pengukuran Oksigen Terlarut.....	36
3.3.3.3	Pengukuran <i>Total Dissolved Solids</i> (TDS).....	36
3.3.3.4	Pengukuran Daya Hantar Listrik (DHL)	37
3.3.3.5	Pengukuran Suhu.....	37
3.3.4	Analisis Data	38

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Perlakuan Degradasi Limbah Batik Menggunakan Plasma <i>Corona</i> dengan Variasi <i>Multibubble-ozone</i>	41
4.2	Pengujian Parameter Kualitas Air Limbah Batik	46
4.2.1	Absorbansi	46
4.2.2	Oksigen Terlarut	48
4.2.3	<i>Total Dissolved Solids</i> (TDS)	52
4.2.4	Daya Hantar Listrik.....	55
4.2.5	Suhu	58
4.3	Efektivitas Teknologi <i>Multibubble-ozone</i> Berbasis Plasma <i>Corona</i> dalam Menurunkan Kandungan Polutan pada Limbah Batik	61

V. SIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Fase Suatu Materi (Putra & Susanto, 2021).....	14
2. Skema Rangkaian Plasma <i>Corona</i> (Nugraha et al., 2019).....	17
3. Perbandingan karakteristik gelembung mikro dengan gelembung	21
4. Skema Alat Spektrofotometer UV-Vis (<i>single beam</i>)	24
5. Skema Alat Spektrofotometer UV-Vis (<i>double beam</i>)	24
6. Generator Plasma <i>Corona</i>	32
7. 500 ml Limbah Batik	33
8. 500 ml <i>Aquades</i>	33
9. Alat Spektrofotometer UV-Vis	34
10. Alat <i>Portable Multiparameter Water Quality Meter</i>	35
11. Diagram Alir Penelitian	40
12. Degradasi Limbah Tampak Samping.....	42
13. Degradasi Limbah Tampak Atas.....	43
14. Sampel Menit ke-0	43
15. Sampel Menit ke-10	44
16. Sampel Menit ke-20	44
17. Sampel Menit ke-30	44
18. Sampel Menit ke-40	45
19. Sampel Menit ke-50	45
20. Sampel Menit ke-60	46
21. Hasil Absorbansi	47
22. Grafik Hubungan Panjang Gelombang dengan Absorbansi	47
23. Pengujian Oksigen Terlarut pada Sampel Menit ke-0	49
24. Pengujian Oksigen Terlarut pada Sampel Menit ke-30	50
25 . Pengujian Oksigen Terlarut pada Sampel Menit ke-60	50

26.	Grafik Hubungan Waktu Ozonasi dengan Kadar Oksigen Terlarut	51
27.	Pengujian TDS pada Sampel Menit ke-0	52
28.	Pengujian TDS pada Sampel Menit ke-30	53
29.	Pengujian TDS pada Sampel Menit ke-60	53
30.	Grafik Hubungan Waktu Ozonisasi dengan TDS	54
31.	Pengujian Daya Hantar Listrik pada Sampel Menit ke-0.....	56
32.	Pengujian Daya Hantar Listrik pada Sampel Menit ke-30.....	56
33.	Pengujian Daya Hantar Listrik pada Sampel Menit ke-60.....	57
34.	Grafik Hubungan Waktu Ozonisasi dengan Daya Hantar Listrik.....	57
35.	Pengujian Suhu pada Sampel Menit ke-0	59
36.	Pengujian Suhu pada Sampel Menit ke-30	59
37.	Pengujian Suhu pada Sampel Menit ke-60	60
38.	Grafik Hubungan Waktu Ozonisasi dengan Suhu	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Alat Penelitian.....	30
2. Bahan Penelitian	31
3. Baku mutu kualitas air berdasarkan SNI.....	35

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Batik telah menjadi bagian penting dari kehidupan sehari-hari masyarakat Indonesia, baik dalam kegiatan adat, acara resmi, maupun penggunaan sehari-hari. Bahkan batik seringkali dijadikan simbolis atau hadiah dalam acara nasional, maupun internasional. Sejak tahun 2009, batik mendapat pengakuan dari UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) sebagai *Intangible Cultural Heritage of Humanity* atau Budaya Tak Benda Warisan Manusia. Pengakuan ini membawa konsekuensi bagi Indonesia untuk menjaga, melindungi, dan melestarikan tradisi batik agar tetap bertahan sebagai identitas budaya bangsa di kancah dunia (Amalia et al., 2024). Industri batik memiliki prospek pengembangan yang luas karena mampu memadukan nilai budaya dengan kreativitas seni yang terus berinovasi. Peningkatan minat masyarakat terhadap produk lokal yang autentik dan berkualitas menjadi salah satu buktinya. Dengan mengoptimalkan penggunaan pewarna alami serta menghadirkan motif khas dari berbagai daerah, batik tulis berpotensi memperluas jangkauan pasar, meningkatkan daya jual, sekaligus mendukung sektor pariwisata melalui keberadaan kampung batik sebagai destinasi wisata budaya (Ibadurrahman & Muhibban, 2025).

Akan tetapi, di balik manfaat ekonomi yang dihasilkan, perkembangan industri batik juga menimbulkan tantangan baru yang berkaitan dengan aspek lingkungan hidup. Khususnya pada tahap produksi batik, seringkali menghasilkan limbah cair yang langsung dialirkan ke badan air di sekitarnya. Kondisi ini menimbulkan berbagai dampak yang merugikan, antara lain pencemaran saluran air, terganggunya ekosistem perairan yang berdampak pada keberlangsungan hidup ikan maupun mikroorganisme, serta menurunnya kualitas air yang seharusnya dapat dimanfaatkan masyarakat untuk kebutuhan sehari-hari, seperti konsumsi, rekreasi, maupun sumber air bersih (Hannan et al., 2024).

Limbah yang dihasilkan oleh produksi batik berupa limbah cair yang menjadi suatu tantangan bagi industri batik. Limbah cair merupakan air bekas pakai dari berbagai proses penggunaan yang telah mengandung bahan pencemar atau polutan berupa senyawa organik dan anorganik. Pada umumnya, air limbah atau limbah cair memiliki kuantitas yang lebih besar dibandingkan limbah jenis lainnya dan memiliki tipikal kandungan polutan yang lebih beragam, antara lain; minyak, alkohol, fenol, pewarna sintesis, dan logam berat (Martini et al., 2020). Berdasarkan data Kementerian Perindustrian tahun 2017, produksi batik di Indonesia mencapai rata-rata sekitar 500 juta meter kain per tahun. Jumlah produksi tersebut diperkirakan membutuhkan sekitar 25 juta m³ air, yang setara dengan pemenuhan kebutuhan air bersih tahunan bagi kurang lebih 2.500 rumah tangga. Sekitar 85% dari penggunaan air bersih tersebut berubah menjadi limbah cair batik yang volumenya besar, berwarna pekat, serta memiliki bau yang menyengat (Indrayani, 2018).

Limbah cair dari industri batik ini mengandung berbagai zat berbahaya, termasuk bahan organik seperti COD (*Chemical Oxygen Demand*), BOD (*Biological Oxygen Demand*), TSS (*Total Suspended Solids*), serta logam berat, dan karakteristik suhu. Kadar COD dan TSS yang tinggi dapat memicu masalah kesehatan bagi manusia, merusak kehidupan biota perairan, serta menimbulkan bau tidak sedap dan kekeruhan pada air (Hannan et al., 2024). Suhu air yang tinggi dapat menurunkan kadar oksigen terlarut, sehingga berpotensi mematikan organisme akuatik. Selain itu, keberadaan limbah organik dapat meningkatkan kandungan nitrogen dalam bentuk senyawa nitrat yang menimbulkan bau tidak sedap. Kondisi tersebut terjadi akibat penggunaan berbagai bahan kimia dan zat warna dalam proses produksi batik. Bahan kimia yang umum digunakan antara lain soda kaustik (NaOH), soda abu (Na₂CO₃), soda kue (NaHCO₃), asam sulfat (H₂SO₄), sulfit, dan nitrit (Murniati dan Muljadi, 2013). Sementara itu, jenis zat warna yang digunakan meliputi zat warna asam, basa, reaktif, naftol, dan bejana. Selain zat warna, proses fiksasi pada pembuatan kain batik juga melibatkan penggunaan zat mordan atau pengunci warna yang mengandung berbagai senyawa kimia, seperti tawas (KAl(SO₄)₂), tunjung (FeSO₄), pijer/boraks, air kapur (Ca(OH)₂), kalsium karbonat (CaCO₃), kalsium hidroksida (Ca(OH)₂), asam sitrat (C₆H₈O₇), tembaga (II) sulfat (Cu₂(CH₃COO)₄),

besi sulfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), dan kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Apabila limbah cair hasil proses tersebut dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan terlebih dahulu, maka dapat menimbulkan pencemaran lingkungan, khususnya pada ekosistem perairan (Indrayani, 2018). Oleh karena itu, penanganan limbah cair batik menjadi isu penting yang harus segera ditangani dengan pendekatan teknologi yang efektif dan berkelanjutan.

Berbagai metode pengolahan limbah batik telah dikembangkan dengan berbagai teknologi yang digunakan. Salah satunya dengan menggunakan teknologi plasma. Plasma dapat terjadi ketika suhu atau energi dari suatu gas dinaikkan hingga memungkinkan untuk atom-atom gas mengalami reaksi tumbukan elektron dan terionisasi, yang membuat gas tersebut dapat melepaskan elektronnya (Indarwati et al., 2022). Teknologi plasma *corona* telah terbukti efektif dalam menguraikan senyawa-senyawa tersebut melalui proses oksidasi yang intensif. Menurut studi oleh (Chu et al., 2008), teknologi ozon gelembung mikro dapat meningkatkan laju transfer massa ozon dan mempercepat proses oksidasi pada limbah cair tekstil. Ozon memiliki sifat khas yang menguntungkan, yaitu kemampuan bereaksi cepat, tidak meninggalkan residu berbahaya karena terurai menjadi oksigen murni, dan dapat digunakan secara fleksibel dalam berbagai kondisi operasional. Selain itu, kombinasi antara teknologi plasma *corona* dan ozon mikrogelembung menawarkan solusi yang efisien dan ramah lingkungan dalam pengolahan limbah batik. Kelebihan utama dari teknologi ini adalah kemampuannya dalam menghasilkan ozon secara langsung di lokasi pengolahan, mengurangi kebutuhan akan bahan kimia tambahan, serta menghasilkan produk sampingan yang tidak berbahaya. Dengan demikian, teknologi ini sangat potensial untuk diterapkan dalam industri batik sebagai alternatif pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mendukung potensi kegunaan teknologi plasma *corona* dalam mengurai limbah batik. Penelitian yang dilakukan oleh (Kusumandari et al., 2022) mengkaji penerapan teknologi plasma udara atmosfer dengan metode *corona discharge* untuk mendegradasi zat warna pada air limbah batik. Proses plasma dilakukan pada tekanan atmosfer dengan memanfaatkan udara sebagai sumber gas, sehingga sistem yang digunakan relatif sederhana dan tidak memerlukan kondisi vakum maupun gas tambahan. Hasil penelitian menunjukkan

adanya penurunan nilai absorbansi yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya waktu pemaparan dan peningkatan tegangan, yang mengindikasikan terjadinya degradasi senyawa pewarna akibat pembentukan spesies reaktif seperti radikal hidroksil dan ozon. Penelitian ini memiliki nilai sebagai studi awal karena berhasil menunjukkan potensi plasma *corona* discharge sebagai salah satu proses oksidasi lanjut dalam pengolahan air limbah batik. Namun, evaluasi keberhasilan proses masih terbatas pada perubahan warna, tanpa disertai analisis parameter kualitas air lainnya seperti COD, TDS, TSS, maupun identifikasi senyawa hasil degradasi, sehingga efektivitas penurunan beban pencemar secara menyeluruh belum dapat diketahui. Selain itu, aspek efisiensi energi dan penerapan pada volume limbah yang lebih besar juga belum dibahas secara mendalam, sehingga masih diperlukan penelitian lanjutan untuk memperoleh gambaran kinerja proses yang lebih komprehensif.

Penelitian Putra & Susanto (2021) membahas penerapan gelombang plasma, elektrokoagulasi, serta kombinasi keduanya dalam menurunkan kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*) pada air limbah batik. Sampel limbah batik yang digunakan memiliki kadar COD awal sebesar $435 \pm 10 \text{ mgO}_2/\text{l}$, melebihi baku mutu yang ditetapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan plasma saja dan elektrokoagulasi saja hanya menghasilkan penurunan COD yang relatif kecil dengan efisiensi masing-masing sebesar 8,1% dan 12,6%, sehingga belum efektif dalam menurunkan beban pencemar limbah batik. Efektivitas pengolahan meningkat secara signifikan ketika kedua metode dikombinasikan, khususnya pada metode plasma–elektrokoagulasi yang mampu menurunkan COD hingga $240 \pm 10 \text{ mgO}_2/\text{L}$ dengan efisiensi 44,8%, sedangkan metode elektrokoagulasi–plasma menghasilkan efisiensi 42,5%. Penelitian ini memiliki nilai kuat pada penyajian perbandingan langsung antar metode dan kuantifikasi efisiensi penurunan COD, sehingga memberikan gambaran jelas mengenai keunggulan kombinasi proses dibandingkan metode tunggal. Namun, kajian ini masih terbatas pada parameter COD tanpa disertai analisis parameter kualitas air lain seperti warna secara kuantitatif, TDS, TSS, maupun potensi pembentukan produk antara, serta belum membahas aspek konsumsi energi secara rinci, sehingga kinerja proses secara menyeluruh dan implikasi lingkungannya belum dapat dievaluasi secara

komprehensif. Sementara itu, penelitian lain yang membandingkan konfigurasi reaktor DBD menunjukkan bahwa konfigurasi seri lebih unggul dalam menghasilkan radikal OH dan ozon, serta mampu mencapai efisiensi degradasi limbah batik sebesar 53,14% setelah 60 menit pengolahan (Abdurrahman et al., 2025.)

Mengacu pada penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini difokuskan pada ukuran variasi gelembung agar proses transfer massa ozon dapat meningkat dibandingkan hanya dengan satu ukuran gelembung saja. Generator plasma corona pada penelitian ini dimodifikasi dengan penerapan teknologi *multibubble-ozone*, yaitu sistem yang memungkinkan ozon hasil lucutan plasma didispersikan ke dalam cairan dalam bentuk gelembung dengan variasi ukuran. Gelembung yang dihasilkan merupakan kombinasi antara *macrobubble* dengan ukuran sekitar 10 μm dan *microbubble* dengan ukuran sekitar 5 μm . Variasi ukuran gelembung ini dirancang untuk meningkatkan efektivitas proses transfer massa ozon dari fase gas ke fase cair sehingga kontak antara ozon dan limbah menjadi lebih optimal. Gelembung berukuran kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar dan waktu tinggal yang lebih lama di dalam cairan sehingga dapat meningkatkan kelarutan ozon serta mendorong pembentukan spesies oksidator reaktif yang berperan dalam proses degradasi senyawa pencemar. Sementara itu, gelembung yang lebih besar berperan dalam membantu sirkulasi fluida dan penyebaran ozon di dalam larutan sehingga distribusi gas menjadi lebih merata. Dengan adanya kombinasi ukuran gelembung tersebut, teknologi *multibubble-ozone* diharapkan mampu meningkatkan efisiensi proses oksidasi dan mempercepat degradasi zat warna serta senyawa organik yang terkandung dalam limbah batik. Metode pengukuran parameter kualitas air pada penelitian ini meliputi pengukuran nilai absorbansi, oksigen terlarut, *Total Dissolved Solids* (TDS), daya hantar listrik, dan suhu untuk mengetahui perubahan karakteristik limbah selama proses pengolahan. Pengukuran absorbansi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui tingkat konsentrasi zat warna dalam limbah, dimana penurunan nilai absorbansi menunjukkan terjadinya proses degradasi senyawa berwarna. Oksigen terlarut diukur untuk mengetahui jumlah oksigen yang terlarut di dalam air sebagai salah satu indikator kualitas air. Parameter TDS digunakan untuk mengetahui jumlah total zat padat terlarut dalam

air, sedangkan daya hantar listrik menunjukkan kemampuan larutan menghantarkan arus listrik yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion terlarut. Selain itu, suhu diukur untuk memantau kondisi termal selama proses pengolahan karena perubahan suhu dapat mempengaruhi kelarutan gas dan kestabilan ozon dalam larutan. Penelitian ini diharapkan mampu menjadi solusi alternatif dalam pengolahan limbah batik yang lebih efektif, cepat, ramah lingkungan, serta dapat diaplikasikan dalam skala industri. Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi plasma dan ozonisasi, tetapi juga memiliki nilai praktis dalam mendukung pembangunan berkelanjutan serta pelestarian lingkungan hidup.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana prinsip kerja degradasi limbah batik menggunakan teknologi *multibubble-ozone* oleh plasma *corona*?
2. Bagaimana perbandingan parameter kualitas air limbah batik sebelum dan sesudah mengalami proses degradasi?
3. Bagaimana efektivitas teknologi *multibubble-ozone* pada plasma *corona* dalam menurunkan kandungan polutan pada limbah batik?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui prinsip kerja degradasi limbah menggunakan teknologi plasma *corona*.
2. Mengukur perbandingan parameter kualitas air limbah batik sebelum dan sesudah mengalami proses degradasi.
3. Mengetahui efektivitas teknologi *multibubble-ozone* berbasis plasma *corona* dalam menurunkan kandungan polutan pada limbah batik.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya pada bidang fisika lingkungan.

2. Referensi bagi industri batik dalam memilih sistem pengolahan limbah yang lebih efisien dan ramah lingkungan dengan peningkatan ruang lingkup alat.
3. Membantu lembaga terkait dalam mengembangkan metode pengolahan limbah yang inovatif dan berkelanjutan.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Limbah yang digunakan merupakan limbah cair batik yang diambil dari salah satu industri batik.
2. Parameter yang dianalisis meliputi absorbansi (UV-Vis), oksigen terlarut, TDS, daya hantar listrik, dan suhu.
3. Teknologi pengolahan yang diteliti hanya menggunakan sistem *multibubble-ozone* dengan ozon yang dihasilkan dari generator plasma *corona*.
4. Pengambilan sampel per sepuluh menit (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60).
5. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Industri Batik

Pengakuan terhadap produk unggulan suatu daerah sebagai simbol identitas lokal dan bagian dari kekayaan budaya memiliki peran penting dalam mendorong pembangunan masyarakat yang berkelanjutan. Salah satu produk yang memiliki keterikatan kuat dengan warisan leluhur serta telah diakui keberadaannya oleh dunia internasional adalah batik. Batik merupakan kearifan lokal yang sangat penting dalam melestarikan kekayaan keanekaragaman budaya Indonesia. Desain batik setiap daerah menunjukkan karakteristik unik yang mencerminkan sejarah, mitos, tradisi, alam sekitar, dan tentunya kearifan lokal berdasarkan daerah masing-masing. Pola batik dalam batik juga berfungsi sebagai identitas khas yang membedakan satu daerah dengan daerah lainnya. Batik tidak hanya dipandang sebagai hasil karya seni, tetapi juga sebagai elemen warisan budaya Indonesia yang sangat berharga dan menjadi bagian dari identitas nasional. Pengakuan terhadap nilai budaya tersebut dipertegas pada tanggal 2 Oktober 2009 oleh UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) secara resmi menetapkan batik sebagai warisan budaya tak benda. Pengakuan ini menunjukkan bahwa batik memiliki posisi penting dalam memperkaya keanekaragaman budaya dunia serta menegaskan identitas budaya Indonesia di kancah internasional (Widiastuti et al., 2024). Tujuan utamanya adalah untuk memberikan perlindungan terhadap kekayaan budaya tersebut melalui berbagai upaya yang mendorong partisipasi masyarakat. Inskripsi ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran kolektif, baik pada tingkat lokal, nasional, maupun internasional, mengenai pentingnya pelestarian warisan budaya takbenda. Selain itu, pencatatan ini juga bertujuan untuk memastikan adanya kerja sama yang kuat, baik di dalam negeri maupun dengan komunitas internasional, guna menjaga keberlanjutan dan kelestarian batik sebagai bagian penting dari identitas budaya bangsa (Fauzi, 2022).

Batik merupakan salah satu tradisi budaya yang berasal dari Nusantara (Asia Tenggara) dan telah berkembang sejak abad ke-9, khususnya berkaitan erat dengan kerajaan-kerajaan di Jawa. Secara bahasa, kata “batik” berasal dari bahasa Jawa yang memiliki makna “menulis”. Sedangkan secara harfiah, batik dapat diartikan sebagai teknik menekan atau menuliskan pembuatan motif pada kain dasar dengan cara mengaplikasikan lilin atau malam sebagai perintang warna sebelum kain tersebut dicelupkan ke dalam zat pewarna. Proses ini dilakukan secara berulang hingga tercipta motif yang diinginkan atau biasanya motif berdasarkan ciri khas daerah masing-masing (Nur et al., 2023). Kegiatan membatik telah dikerjakan oleh orang-orang Mesir sekitar 4000 tahun sebelum Masehi, akan tetapi penggunaan warnanya berdasarkan bahan-bahan alami. Misalnya, warna merah berasal dari sejenis kerang yang dapat menghasilkan warna merah, warna biru berasal dari kulit pohon indigofera, dan warna kuning berasal dari sejenis kerang menghasilkan warna kuning atau bunga-bunga warna kuning. Bahan-bahan tersebut diproses dengan cara dihaluskan, direbus, dan airnya akan dipakai dalam pencelupan kain. Kain tersebut berasal dari sejenis kapas yang menghasilkan kain katun atau linen yang terdapat di daerah sepanjang Sungai Nil, Mesir. Alat yang digunakan untuk menggambar adalah bambu atau kayu sebagai kuas, sedangkan lilinnya diambil dari malam lebah. Budaya batik ini sangat berkembang pesat di daerah Mesir hingga ke tanah Persia dengan desain-desain yang disesuaikan dengan kepercayaan masyarakat setempat. Melalui sistem hubungan dagang, batik menyebar hingga ke India, lalu melebur sampai ke tanah Melayu atau Nusantara, yang hingga saat ini menjadi seni yang tertanam sebagai tatanan budaya Indonesia (Wijayanti, 2012). Batik sebagai warisan turun-temurun mengandung nilai-nilai filosofis yang mencerminkan ajaran luhur serta pandangan hidup masyarakat yang melestarikannya (Suharson, 2021).

Ditinjau dari teknik pembuatannya, dibagi menjadi dua, yaitu batik tulis dan batik cap. Pembuatan batik tulis diawali dengan mencuci kain untuk menghilangkan sisa kanji pada permukaannya, kemudian membuat sketsa motif menggunakan pensil. Setelah itu, pola tersebut dibatik menggunakan canting tulis, lalu kain dicelupkan ke dalam zat warna Naphtol. Selanjutnya, kain direbus dalam air mendidih yang dicampur soda ash untuk menghilangkan lilin, kemudian dicuci hingga bersih, dan

proses pembuatan batik pun selesai. Sedangkan pembuatan batik cap dimulai dengan mencuci kain untuk menghilangkan sisa kanji pada permukaannya, kemudian mencap kain dengan cap yang telah dipanaskan dan dicelupkan ke dalam lilin atau malam. Pola dibentuk dengan mengatur dan menempelkan cap secara berulang hingga motif selesai. Setelah itu, kain dicelup ke dalam zat warna Naphtol, lalu direbus dalam air mendidih yang dicampur soda *ash* untuk menghilangkan lilin, kemudian dicuci hingga bersih hingga proses selesai. Adapun teknik batik cap-tenun yang merupakan perkembangan dari batik cap, kemudian dilanjutkan dengan proses tenun. Teknik pembuatan batik tenun diawali dengan menenun kain lusi secara rapat sementara benang pakan dibuat lebih jarang, kemudian kain tersebut dibatik dengan cap. Selanjutnya, kain diberi warna menggunakan teknik colet dengan zat warna indigosol, lalu direbus untuk menghilangkan lilin dan dicuci hingga bersih. Setelah itu, benang-benang dipasang pada sisir tenun jarum di alat tenun untuk memulai proses penenunan. Pada tahap penenunan ini dapat digunakan benang pakan dengan warna yang sesuai, dan ketika proses selesai, kain akan memiliki tampilan khas yang menjadi ciri dari batik tenun (Wijayanti, 2012).

Industri batik merupakan sektor yang memiliki potensi ekonomi yang sangat besar, terutama sebagai sumber pendapatan bagi negara melalui kontribusinya terhadap penerimaan pajak, devisa ekspor, dan penyerapan tenaga kerja dalam jumlah yang luas. Tingginya permintaan pasar, baik dari konsumen dalam negeri maupun mancanegara, menunjukkan bahwa produk batik memiliki nilai jual yang kuat dan terus diminati di berbagai kalangan. Kondisi ini menciptakan peluang yang besar bagi pengembangan industri batik, mulai dari peningkatan kapasitas produksi, inovasi desain, diversifikasi produk, hingga perluasan pasar ekspor. Dengan permintaan yang stabil dan cenderung meningkat, industri batik berpotensi terus tumbuh dan memberikan dampak positif terhadap perekonomian nasional, khususnya dalam mendorong pertumbuhan sektor kreatif dan meningkatkan kesejahteraan para pelaku usaha serta pengrajin batik (Purwaningrum, 2024). Industri batik di Indonesia mencakup berbagai skala usaha, mulai dari industri besar, menengah, kecil, hingga industri rumah tangga (*home industry*). Kondisi ini menyebabkan pencemaran lingkungan akibat aktivitas industri batik tidak hanya terjadi di kawasan industri, tetapi juga meluas hingga ke kawasan permukiman

padat penduduk. Besarnya potensi pencemaran terlihat dari volume limbah cair yang dihasilkan, di mana salah satu UKM batik di Yogyakarta menghasilkan sekitar 125 liter limbah cair per kilogram kain batik, sedangkan di Pekalongan mencapai sekitar 100 liter per kilogram batik. Proses produksi batik membutuhkan air dalam jumlah yang besar dan menghasilkan limbah yang kaya akan zat warna, mengandung residu pewarna reaktif serta berbagai bahan kimia, sehingga diperlukan pengelolaan yang tepat sebelum limbah tersebut dilepaskan ke lingkungan (Apriyani, 2018)

2.2 Limbah Batik

Limbah adalah sisa dari suatu proses produksi atau bahan yang tidak memiliki nilai guna maupun nilai ekonomis serta tidak lagi dapat dimanfaatkan untuk tujuan utama dalam proses pembuatan atau pemakaian. Dengan kata lain, limbah dapat didefinisikan sebagai buangan yang dihasilkan dari suatu proses produksi, baik yang berasal dari kegiatan industri maupun dari aktivitas domestik (rumah tangga). Beberapa karakteristik limbah antara lain berukuran mikro, bersifat dinamis, memiliki penyebaran yang luas, serta menimbulkan dampak dalam jangka panjang. Oleh karena itu, limbah perlu diolah dengan tepat agar tidak membahayakan lingkungan dan makhluk hidup. Limbah organik umumnya dapat diuraikan secara alami, sedangkan limbah anorganik dapat dikelola melalui proses daur ulang. Selain itu, terdapat pula limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang memiliki tingkat toksisitas tinggi sehingga memerlukan penanganan khusus dan serius oleh instansi terkait (Martiyah et al., 2020). Limbah juga menjadi salah satu faktor penyebab kerusakan lingkungan hidup yang hingga saat ini masih menjadi permasalahan besar, di mana dampak negatif yang ditimbulkan tidak hanya menurunkan tingkat higienitas, tetapi juga mengurangi kualitas lingkungan (Andriani et al., 2021).

Limbah merupakan permasalahan serius di Indonesia yang jumlahnya terus meningkat seiring berjalannya waktu. Permasalahan ini bersumber dari berbagai sektor, terutama sektor industri. Limbah industri menjadi salah satu isu penting yang perlu mendapat perhatian dari pelaku industri maupun pemerintah karena dapat menimbulkan berbagai dampak berbahaya serta kerusakan lingkungan yang berpengaruh terhadap makhluk hidup apabila tidak dikelola dengan baik. Limbah

industri merupakan sisa atau residu yang dihasilkan dari proses kegiatan produksi. Jenis limbah yang dihasilkan bervariasi tergantung pada jenis industri dan produk yang dihasilkan. Sebagai contoh, industri tekstil tidak hanya menghasilkan limbah domestik, tetapi juga limbah lain berupa sisa pewarna tekstil yang digunakan dalam proses produksi. Secara umum, limbah industri dapat diklasifikasikan ke dalam empat kelompok, yaitu limbah cair, limbah padat, limbah gas, serta limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) (Nanda et al., 2024).

Menurut (Martiyah et al., (2020), limbah cair merupakan segala jenis limbah yang berwujud cair atau berbentuk cairan. Limbah ini dapat berupa cairan buangan yang tercampur maupun terlarut di dalam air sebagai hasil dari berbagai aktivitas manusia. Limbah cair dapat berasal dari kegiatan domestik maupun industri, dan umumnya mengandung berbagai zat kimia, organik, maupun anorganik. Contoh limbah cair antara lain air sabun dan sisa detergen dari aktivitas rumah tangga, cairan buangan hasil proses industri, cairan rembesan, serta berbagai jenis buangan cair lainnya yang apabila tidak dikelola dengan baik dapat mencemari lingkungan perairan.

Dalam industri batik, proses pewarnaan merupakan salah satu tahapan utama yang memiliki peran sangat penting dan tidak dapat dihilangkan dari keseluruhan proses produksi. Tahap pewarnaan dilakukan untuk memberikan motif dan nilai estetika pada kain batik dengan menggunakan berbagai jenis zat pewarna tekstil. Namun demikian, penggunaan zat pewarna tersebut berpotensi menghasilkan limbah, terutama limbah cair, yang apabila tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Limbah hasil proses pewarnaan umumnya mengandung senyawa kimia yang sulit terurai, sehingga dapat mencemari badan air dan berdampak negatif terhadap ekosistem serta kesehatan masyarakat di sekitarnya. Pada umumnya limbah industri batik terdiri dari sisa mori, ceceran lilin, sisa air pewarnaan, sisa lilin dan air pelorodan. Pewarna yang umum digunakan dalam industri batik adalah pewarna sintetis karena mudah diperoleh dan mampu menghasilkan warna-warna yang cerah. Beberapa contoh pewarna sintetis yang sering digunakan antara lain indigosol, naphthol, dan indanthrene. Penggunaan pewarna sintetis tersebut, bersama dengan proses lain dalam pembuatan batik seperti pelepasan lilin, pencucian, perendaman, dan pembilasan, akan

menghasilkan limbah cair yang mengandung zat pewarna serta minyak (Apriyani, 2018). Limbah cair batik umumnya bersifat basa, berwarna pekat, serta memiliki nilai COD dan BOD tinggi. Limbah ini mengandung zat warna sintesis, logam berat, fenol, surfaktan, dan senyawa lain yang sulit terdegradasi (Adirajasa et al., 2022). Selain itu, limbah cair batik memiliki karakteristik berupa suhu yang relatif tinggi, tingkat keasaman (pH) yang tidak netral, serta nilai *Total Suspended Solid* (TSS) yang tinggi (Hidayatullah et al., 2023).

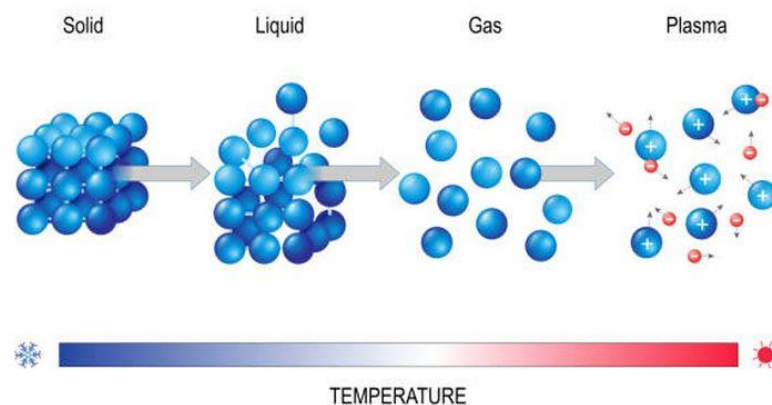
Air limbah yang dibuang ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, terutama pada ekosistem perairan. Suhu limbah yang tinggi dapat menurunkan kadar oksigen terlarut atau *Dissolved Oxygen* (DO) di dalam air, sehingga berpotensi membunuh organisme akuatik dan mengganggu keseimbangan ekosistem perairan (Belladonna et al., 2020). Pencemaran air merupakan suatu kondisi yang terjadi akibat masuknya beban pencemar atau limbah buangan berupa gas, zat terlarut, maupun partikel ke dalam badan perairan. Masuknya pencemar tersebut dapat berlangsung melalui berbagai media dan aktivitas, seperti melalui atmosfer, tanah, limpasan (*run off*) dari lahan pertanian, serta pembuangan limbah yang berasal dari kegiatan domestik, perkotaan, industri, dan sumber lainnya. Pencemaran terjadi bila dalam lingkungan terdapat bahan yang menyebabkan timbulnya perubahan yang tidak diharapkan, baik yang bersifat fisik, kimiawi, maupun biologis (Liku et al., 2022). Limbah pewarna ikat dapat mencemari badan sungai, tetapi juga menyebabkan terjadinya penyempitan dan pendangkalan sungai. Dampak jangka pendek yang ditimbulkan antara lain perubahan kualitas air menjadi keruh, sedangkan dalam jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan lahan di sekitar aliran sungai serta mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik. Hal inilah yang terjadi pada limbah batik jika dibuang ke badan perairan karena mengandung bahan kimia yang berpotensi mencemari lingkungan. Sedimen yang berasal dari limbah tersebut dapat mengubah warna air sungai menjadi kehitaman serta menimbulkan bau tidak sedap, sehingga menurunkan kualitas lingkungan perairan (Hannan et al., 2024).

Untuk mengurangi pencemaran lingkungan akibat pembuangan limbah cair batik, diperlukan upaya pengolahan air limbah yang tepat. Pengolahan limbah cair dapat diklasifikasikan ke dalam tiga metode, yaitu pengolahan secara fisik, kimia, dan

biologi, maupun kombinasi dari ketiga metode tersebut. Penerapan masing-masing metode disesuaikan dengan karakteristik air limbah yang dihasilkan (Hidayatullah et al., 2023). Salah satu metode yang dapat digunakan dengan teknologi *multibubble-ozone* yang dihasilkan plasma *corona*.

2.3 Plasma Corona

Teknologi plasma pertama kali diperkenalkan oleh Langmuir dan Tonks pada tahun 1928. Mereka mendefinisikan plasma sebagai gas yang terionisasi yang terbentuk dalam suatu proses lucutan Listrik (Khamdi & Aminah, 2012). Plasma merupakan suatu gas yang terionisasi yang disertai dengan keberadaan sebaran elektron, di mana suhu elektron jauh lebih tinggi dibandingkan suhu ion plasma, serta plasma dikenal sebagai fase keempat dari materi selain padat, cair, dan gas.



Gambar 1. Fase Suatu Materi (Putra & Susanto, 2021)

Pemodelan gelombang plasma dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan kontinuitas massa, momentum, dan energi. Ketiga persamaan tersebut selanjutnya dihubungkan dengan persamaan medan elektromagnetik yang dinyatakan dalam persamaan Maxwell. Secara umum, bentuk persamaan Maxwell dalam pemodelan gelombang plasma dapat dijabarkan melalui Persamaan (1).

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= Jf + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E &= - \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot D &= \rho_f \\
D &= \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon_0 E + P \\
H &= \frac{B}{\mu_0} - M \text{ dengan } B = \mu_0 \mu_r H
\end{aligned} \tag{1}$$

(D) merupakan medan listrik, (H) adalah medan magnetik gelombang plasma, dan (B) merupakan medan induksi magnetik gelombang plasma. Selanjutnya, (ρ) menyatakan densitas muatan pada plasma, sedangkan (J) adalah rapat arus pada plasma. Adapun (ε_0) dan (μ_0) masing-masing merupakan permitivitas dan permeabilitas vakum di antara elektroda. Pada kondisi tidak terjadi polarisasi dan magnetisasi, persamaan Maxwell dapat dituliskan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$\begin{aligned}
\nabla \times B &= \mu_0 (Jf + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (E)) \\
\nabla \times E &= - \frac{\partial B}{\partial t} \\
\nabla \cdot B &= 0 \\
\nabla \cdot E &= \frac{1}{\varepsilon_0} (\rho_f)
\end{aligned} \tag{2}$$

dengan

$$\begin{aligned}
\rho_f &= \sum q_s n_s = q(Zn_i + n_e) = e(Zn_i - n_e) \\
Jf &= \rho_f \bar{v} = \sum q_s n_s \bar{v}_s \\
&= q(Zn_i \bar{v}_i + n_e \bar{v}_e) \\
&= q(Zn_i \bar{v}_i - n_e \bar{v}_e)
\end{aligned} \tag{3}$$

Bentuk persamaan Maxwell pada gelombang plasma berbeda dengan gelombang elektromagnetik pada umumnya, dan perbedaannya dapat ditinjau melalui persamaan Maxwell pada hukum Gauss. Adapun bentuk persamaan gelombang elektromagnetik secara umum, baik pada medium konduktor maupun nonkonduktor, dapat dinyatakan pada Persamaan (4).

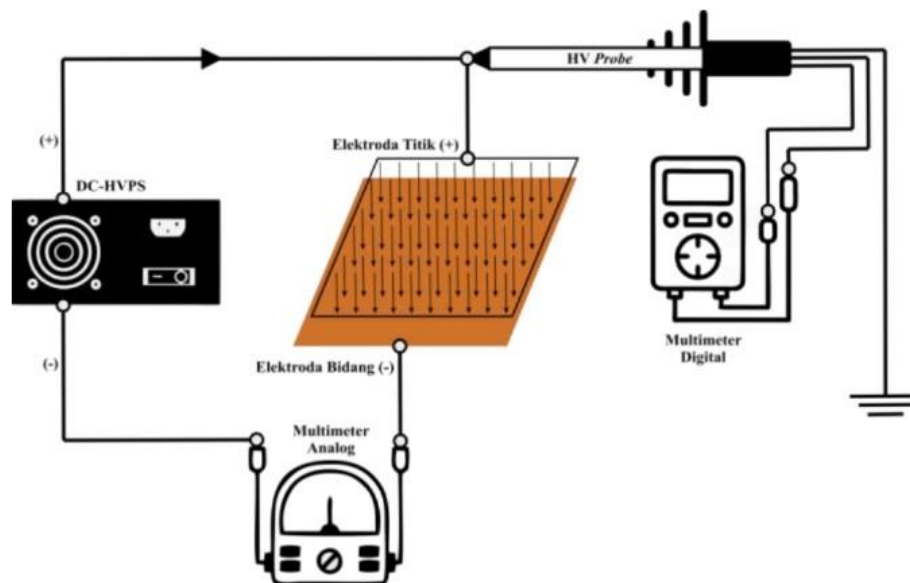
$$\begin{aligned}
\nabla \times B &= \mu_0 (Jf + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (E)) \\
\nabla \times E &= - \frac{\partial B}{\partial t} \\
\nabla \cdot B &= 0
\end{aligned} \tag{4}$$

Berdasarkan jenis suhu pada generator plasma, maka plasma dapat diklasifikasikan ke dalam dua buah jenis plasma, yaitu plasma panas bersuhu tinggi (*thermal plasma*) dan plasma bersuhu rendah (*non-thermal plasma*), yang mana pada plasma bersuhu rendah (*non-thermal plasma*) dapat dikarakteristikkan dengan tidak adanya perubahan suhu pada daerah lingkungan sekitar (antara elektroda dan lingkungan sekitar), sedangkan pada plasma termal atau plasma bersuhu tinggi, besar energi yang digunakan untuk mengionisasikan gas berkisar 10 eV hingga 100 eV dengan suhu 10000 K hingga 100000 K. Terdapat beberapa jenis generator plasma yang dapat diaplikasikan dalam proses tekstil, antara lain plasma *corona*, plasma *dielectric barrier discharge* (DBD), plasma *glow discharge* bertekanan atmosfer (GD), plasma jet bertekanan atmosfer (PJ), serta jenis generator plasma lainnya (Putra & Susanto, 2021).

Menurut teori lucutan listrik, plasma dapat terbentuk di ruang antara dua elektroda yang diberi beda tegangan tertentu. Jika suatu gas dimasukkan ke dalam tabung dan dipanaskan dengan meningkatkan tegangan antar elektroda, elektron (anion) akan bergerak ke arah anoda, sedangkan ion positif (kation) ke arah katoda, sehingga terbentuk aliran arus listrik. Berkas partikel bermuatan ini dipercepat oleh medan listrik antar elektroda, memperoleh energi kinetik, dan mentransfer energinya ke partikel lain melalui tumbukan, yang dapat memanaskan plasma. Tabung lucutan berfungsi sebagai komponen dengan impedansi yang bervariasi sesuai besar tegangan tinggi dari sumber daya eksternal. Ketika tegangan sumber rendah, arus yang mengalir juga rendah karena impedansi tabung masih besar. Saat tegangan dinaikkan secara bertahap, tegangan dapat mencapai tegangan runtuh (*breakdown*), yaitu kondisi di mana impedansi menjadi sangat kecil. Setelah kondisi *breakdown* tercapai, akan terjadi arus lucutan I yang besarnya berubah-ubah sesuai beda tegangan antar elektroda V , yang biasanya lebih rendah dibanding tegangan sumber luar (Purwadi et al., 2002).

Plasma *corona* merupakan salah satu jenis plasma nontermal dan berperan sebagai sumber ion, elektron, serta radikal bebas. Plasma jenis ini telah diaplikasikan dalam berbagai perkembangan teknologi, antara lain pada laser nitrogen, proses ionisasi, dan pembangkitan ozon (Khamdi & Aminah, 2012). Plasma ini dapat dibangkitkan

menggunakan beberapa konfigurasi elektroda yang bersifat tidak simetris serta memanfaatkan gas lingkungan sebagai medium. Plasma *corona* memiliki medan listrik yang besar di sekitar elektroda lancip dan bersifat tidak seragam. Meskipun demikian, plasma *corona* memiliki kemampuan yang cukup baik dalam memodifikasi permukaan substrat polimer, khususnya material tekstil. Namun, plasma ini juga memiliki kelemahan berupa ketidakteraturan hasil modifikasi sifat polimer pada material tekstil. Salah satu bentuk elektroda plasma *corona* yang sering digunakan adalah konfigurasi elektroda tip–silinder. Pada sistem generator plasma *corona*, penerapan teknologi plasma di bidang tekstil memungkinkan terbentuknya energi elektron dan spesies plasma yang cukup tinggi untuk memicu reaksi di daerah plasma tanpa disertai kenaikan suhu yang signifikan. Kondisi ini membuat proses plasma tidak merusak sifat fisik material tekstil yang dipapari oleh gelombang plasma (Putra & Susanto, 2021).



Gambar 2. Skema Rangkaian Plasma *Corona* (Nugraha et al., 2019).

Teknologi perlakuan plasma dapat dikategorikan sebagai salah satu metode rekayasa permukaan bahan tekstil yang unik dan inovatif. Hal ini ditinjau dari kemampuannya yang mencakup aspek fisik, kimiawi, maupun termal, seperti penggunaan temperatur yang relatif rendah, sifat proses yang kering karena tidak melibatkan air, serta proses keseluruhan yang tidak menghasilkan limbah. Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan teknologi perlakuan plasma

menawarkan peluang dan cakupan penelitian yang luas serta inovatif untuk dikembangkan di masa kini (Nugraha et al., 2019).

2.4 Ozon

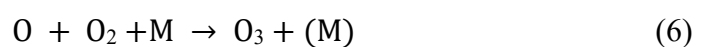
Ozon merupakan oksidator kuat yang banyak dimanfaatkan untuk menonaktifkan bakteri, alga, dan spora, menguraikan senyawa organik, menghilangkan bau, serta dalam proses penjernihan dan pengolahan air. Dalam penerapannya, setiap kebutuhan aplikasi memerlukan karakterisasi dan desain reaktor plasma DBD yang berbeda karena metode yang digunakan akan memengaruhi jumlah atau dosis ozon yang dihasilkan. Secara umum, produksi ozon dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti besar tegangan, jenis elektroda, geometri dan konfigurasi reaktor, laju alir gas, serta sumber gas yang digunakan (Abdurrahman et al., 2022).

Menurut (Nur et al., 2023), ozon merupakan salah satu bentuk gas oksigen yang memiliki rumus kimia O_3 . Gas ini pertama kali ditemukan pada tahun 1840 oleh seorang ahli kimia asal Swiss, Christian Friedrich Schönbein. Ozon bersifat tidak stabil karena mudah terurai dengan melepaskan satu atom oksigen sehingga kembali membentuk molekul oksigen (O_2). Di alam, ozon terdapat pada lapisan stratosfer pada ketinggian sekitar 15–50 km di atas permukaan bumi dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan. Lapisan ozon berfungsi menyaring radiasi *ultraviolet* (UV) berlebih yang berasal dari matahari sehingga melindungi bumi dari paparan sinar UV yang berbahaya. Kerusakan lapisan ozon menyebabkan sinar UV tidak tersaring secara optimal, sehingga dapat menimbulkan berbagai dampak negatif bagi kesehatan manusia serta mengganggu keseimbangan ekosistem. Selain terdapat secara alami di atmosfer, ozon juga dapat diproduksi secara artifisial untuk berbagai keperluan, seperti pengolahan air dan udara, pemusnahan bahan kimia berbahaya, serta aplikasi di bidang kesehatan. Ozon memiliki sifat sterilisasi dan dekontaminasi yang sangat kuat, sehingga efektif dalam membunuh mikroorganisme seperti bakteri, virus, dan jamur. Dalam bidang lingkungan dan industri, ozon banyak dimanfaatkan untuk pengolahan air minum, pengolahan limbah industri dan pertanian, pengawetan makanan, serta pengendalian hama dan penyakit tanaman. Namun demikian, ozon juga tergolong sebagai gas rumah kaca yang kuat dan dapat menimbulkan gangguan kesehatan,

khususnya pada sistem pernapasan, apabila terhirup dalam konsentrasi tinggi. Oleh karena itu, produksi dan pemanfaatan ozon harus dilakukan dengan pengawasan dan pengendalian yang ketat. Secara keseluruhan, ozon memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan memberikan berbagai manfaat bagi kehidupan manusia, namun penggunaannya harus dikelola secara bijak agar tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan maupun kesehatan.

Ozon pada suhu ruang berwarna biru dan memiliki bau yang tajam. Gas ini dapat terdeteksi oleh indera penciuman manusia pada konsentrasi sekitar 0,01–0,05 ppm, dan bersifat sangat reaktif hingga dapat meledak ketika konsentrasinya mencapai sekitar 240 g/m^3 atau sekitar 20% di udara. Ozon tidak dapat disimpan maupun ditransportasikan secara khusus karena memiliki waktu paruh yang sangat singkat, yaitu sekitar 4–6 menit, akibat cepat terdekomposisi kembali menjadi molekul oksigen. Oleh karena itu, ozon harus diproduksi secara *in situ*, yaitu di lokasi yang dekat dengan instalasi pemanfaatannya. Ozon juga dapat dihasilkan menggunakan generator ozon yang bekerja dengan teknologi plasma. Pada proses ini, peningkatan tegangan atau voltase yang diberikan akan menyebabkan jumlah ozon yang terbentuk semakin besar (Moris et al., 2022).

Generator ozon umumnya menggunakan reaktor non-termal plasma (*cold plasma*) dengan model aliran reaktor. Campuran reaktan masuk ke zona aktif, di mana elektron panas menumbuk partikel dan molekul reaktan, menyebabkan ionisasi, disosiasi, atomisasi, dan eksitasi, sehingga terbentuk spesies reaktif seperti atom bebas, radikal, dan ion. Setelah zona aktif, campuran masuk ke zona pasif, di mana terjadi de-ionisasi dan pendinginan elektron sehingga terjadi rekombinasi dan de-eksitasi, menghasilkan produk stabil yang mengandung spesies dari zona aktif dan komponen baru (Nur et al., 2023). Dari hasil tumbukan tersebut, molekul oksigen (O_2) akan terpecah menjadi O dan saling bergabung menjadi ozon (O_3). Reaksi pembentukan ozon secara umum dituliskan pada Persamaan (5) hingga (8).





Persamaan reaksi (5) dan (6) menunjukkan pembentukan ozon. Agar reaksi (6) berlangsung, diperlukan zat ketiga M, yang bisa berupa oksigen, nitrogen, atau dinding tabung. Saat pembentukan ozon terus berlanjut hingga mencapai konsentrasi maksimum, ozon akan terurai kembali melalui reaksi (7) dan (8). Proses pembentukan dan peruraian ozon terjadi secara bersamaan di kedua kutub elektroda (Jannah et al., 2021).

2.5 Gelembung Mikro

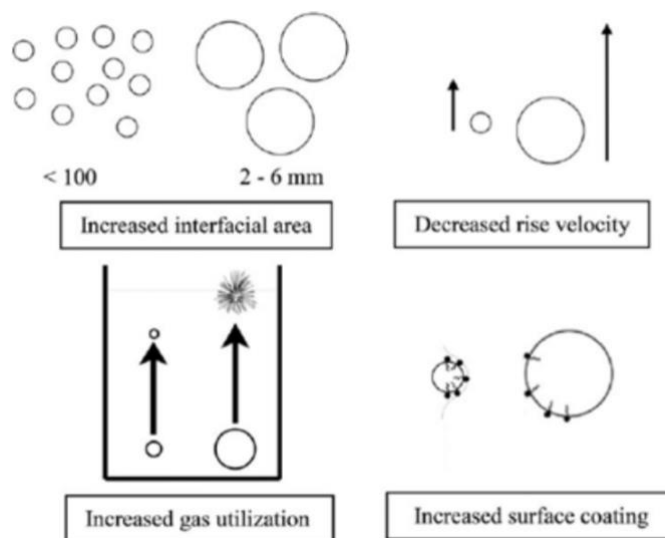
Gelembung adalah kantong kecil berisi gas yang terperangkap di dalam cairan atau padatan, yang dipisahkan dari medium sekitarnya oleh antarmuka gas-cair. Proses ini dikenal sebagai kavitasi dan melibatkan gas-cair sebagai pusat terjadinya fenomena fisika dan kimia berenergi tinggi (Suslick et al., 2018). Kavitasi adalah terbentuknya gelembung-gelembung uap di dalam zat cair akibat turunnya tekanan cairan di bawah tekanan uap jenuhnya. Gelembung terbentuk melalui proses difusi gas terlarut dalam cairan menuju nukleasi, yaitu rongga-rongga dalam cairan, baik berupa celah pada permukaan bahan maupun bagian kecil yang tidak terisi cairan. Ukuran gelembung dipengaruhi oleh tekanan dan suhu di sekitarnya. Ketika tekanan cairan di sekitar rongga rendah, kelarutan gas dalam cairan menurun sehingga gas lebih mudah berdifusi ke dalam rongga dan membentuk gelembung yang lebih besar. Sebaliknya, jika suhu cairan meningkat, ukuran gelembung dan kelarutan gas dalam cairan ikut menurun (David et al., 2022).

Berdasarkan hukum Young-Laplace, seperti yang ditunjukkan pada Persaman (9).

$$P = P_1 + \frac{4}{ab} \quad (9)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil diameter gelembung, tekanan internal di dalam gelembung akan semakin tinggi. Untuk gelembung mikro dengan diameter 1 μm , tekanan internalnya mencapai sekitar 390 kPa, hampir tiga kali tekanan atmosfer. Tekanan tinggi ini juga meningkatkan stabilitas gelembung dalam air atau larutan, yang dikenal sebagai potensial zeta, sehingga gelembung cenderung menolak agregasi dari lingkungan sekitar dan tidak mudah pecah, sehingga memiliki waktu tinggal yang lama. Menurut hukum Henry, jumlah gas

terlarut di sekitar gelembung yang menyusut meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan gas internal. Akibatnya, gas dalam gelembung mikro dapat terlarut dalam air selama proses penyusutan. Tekanan gas interior yang tinggi merupakan karakteristik khas gelembung mikro, di mana tekanan meningkat saat gelembung menjadi lebih kecil, sehingga tekanan berbanding terbalik dengan ukuran gelembung (Nur et al., 2023).



Gambar 3. Perbandingan karakteristik gelembung mikro dengan gelembung konvensional (Nur et al., 2023).

Gelembung mikro merupakan salah satu topik penelitian yang banyak dikaji dalam dua dekade terakhir ini. Gelembung mikro didefinisikan sebagai gelembung yang dengan ukuran yang berada pada rentang milieter hingga nanometer (Roshanti et al., 2023). Gelembung mikro merupakan gelembung berukuran sangat kecil dengan diameter sekitar 10-100 μm yang memiliki sifat berbeda dibandingkan gelembung makro. Gelembung ini bergerak naik dengan kecepatan rendah, mempunyai luas permukaan antarmuka yang besar, serta tekanan internal yang tinggi, sehingga lebih stabil di dalam air dan tidak mudah pecah dalam jangka waktu lama (Athikoh et al., 2021). Gelembung mikro dapat ditemukan pada berbagai bahan, seperti air mineral, produk minuman, produk makanan, serta bahan kimia lainnya. Gelembung ini dapat terbentuk secara alami maupun secara artifisial melalui penggunaan generator gelembung mikro. Gelembung mikro memiliki beragam manfaat yang bergantung

pada bidang penerapannya. Dalam pengolahan air limbah, gelembung mikro dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi proses pemurnian air serta memperbaiki kualitas air hasil olahan, salah satunya dengan mengombinasikannya dengan ozon. Dalam proses ini, gelembung mikro berperan sebagai media pengemulsi atau pengencer yang membantu ozon agar dapat terlarut secara lebih efektif di dalam air. Selain itu, gelembung mikro memiliki waktu tinggal yang relatif lama di dalam larutan dan akan pecah secara perlahan di dalam cairan. Hal ini berbeda dengan gelembung konvensional berukuran lebih besar yang cenderung cepat naik ke permukaan dan pecah di permukaan cairan. Waktu tinggal yang lama tersebut memungkinkan gelembung mikro menyebar ke seluruh bagian larutan, sehingga menghasilkan luas permukaan antarmuka (*interface*) yang lebih besar dan meningkatkan efektivitas proses pengolahan. Gelembung mikro juga sangat cocok untuk dikombinasikan dengan ozon karena mampu mengatasi kelemahan dari ozon, yang terkenal dengan waktu paruh yang pendek dan memiliki koefisien perpindahan massa yang kecil dari fasa gas menuju fasa cair. Dengan demikian, proses pengolahan air limbah batik menjadi lebih optimal (Nur et al., 2023).

2.6 Parameter Kualitas Air Limbah

Pengujian parameter mutu limbah dilakukan setelah sampel diproses menggunakan plasma *corona*. Setiap sampel dengan variasi ukuran gelembung kemudian dianalisis untuk menentukan nilai absorbansi, oksigen terlarut, TDS, daya hantar listrik, serta suhu. Seluruh pengukuran dilakukan memakai instrumen laboratorium sesuai prosedur alat agar data yang diperoleh akurat dan konsisten.

2.6.1 Absorbansi

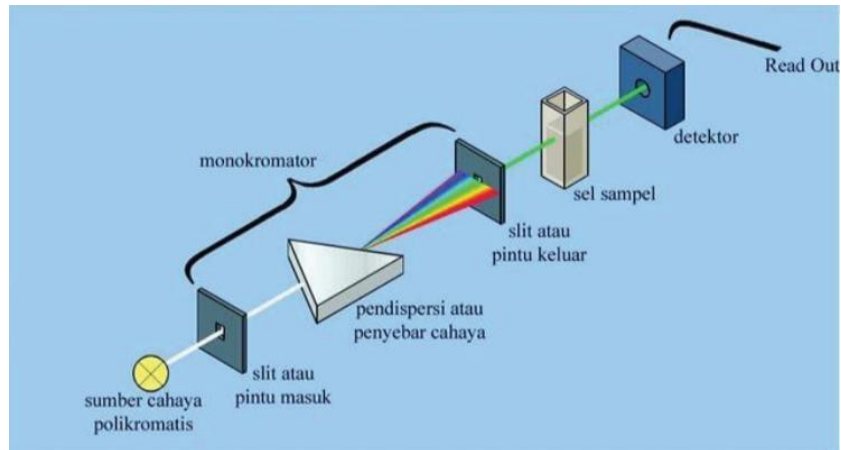
Absorbansi merupakan besaran yang mencerminkan derajat penyerapan cahaya elektromagnetik oleh suatu sampel pada panjang gelombang tertentu ketika radiasi melewatinya, yang dinyatakan sebagai logaritma rasio antara intensitas cahaya yang masuk dan intensitas cahaya yang keluar dari sampel. Berdasarkan hukum Beer–Lambert, nilai absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi zat penyerap dalam larutan serta panjang lintasan cahaya, sehingga semakin besar konsentrasi zat dan lintasan optik, maka semakin besar pula intensitas cahaya yang diserap. Alat yang digunakan bernama spektrofotometer Uv-Vis yang menggunakan radiasi

ultraviolet dan cahaya tampak untuk mengukur jumlah cahaya yang diserap oleh sampel pada berbagai panjang gelombang, sehingga memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi senyawa berdasarkan pola absorpsi spektral yang terjadi akibat interaksi antara cahaya dan molekul dalam sampel (Nandiyanto et al., 2023).

Spektrum cahaya merupakan pengelompokan atau pengklasifikasian cahaya berdasarkan perbedaan karakteristik fisiknya, khususnya frekuensi dan panjang gelombang. Setiap jenis cahaya dalam spektrum memiliki nilai panjang gelombang dan frekuensi yang berbeda, sehingga menghasilkan variasi warna yang dapat diamati maupun yang berada di luar jangkauan penglihatan manusia. Perbedaan inilah yang digunakan sebagai dasar dalam analisis optik dan spektroskopi untuk mempelajari sifat cahaya serta interaksinya dengan materi (Naomi et al., 2018).

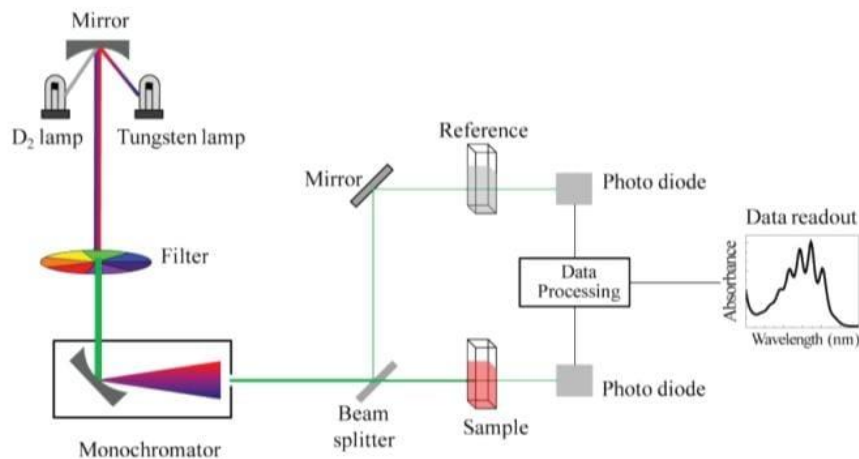
Spektrum penyerapan pada daerah ultraviolet dan cahaya tampak umumnya tersusun atas satu atau beberapa pita serapan yang relatif lebar. Pada dasarnya semua molekul mampu menyerap radiasi pada wilayah UV-Vis karena memiliki elektron, baik elektron ikatan maupun elektron bebas, yang dapat tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Panjang gelombang terjadinya penyerapan dipengaruhi oleh kuat lemahnya ikatan elektron dalam molekul. Elektron yang berada pada ikatan kovalen tunggal terikat lebih kuat sehingga memerlukan energi radiasi yang lebih besar, atau panjang gelombang yang lebih pendek, untuk mengalami eksitasi (Putri, 2017).

Secara umum, spektrofotometer terbagi menjadi dua, yaitu *single-beam* dan *double-beam*. Spektrofotometer *single-beam* digunakan untuk analisis kuantitatif dengan mengukur absorbansi pada satu panjang gelombang tertentu. Instrumen ini memiliki konstruksi sederhana, biaya murah, serta pengoperasian relatif mudah sehingga banyak digunakan pada pengukuran sinar ultraviolet maupun tampak dengan rentang panjang gelombang sekitar 190–210 nm hingga 800–1000 nm.



Gambar 4. Skema Alat Spektrofotometer UV-Vis (*single beam*) (Suhartati, 2017).

Berbeda dengan itu, spektrofotometer *double-beam* bekerja menggunakan dua berkas cahaya yang dihasilkan oleh pemecah sinar berbentuk cermin V. Satu berkas melewati larutan blanko sementara berkas lainnya secara bersamaan melewati sampel sehingga fluktuasi intensitas sumber cahaya dapat dikoreksi secara langsung. Instrumen ini umumnya digunakan pada rentang panjang gelombang 190–750 nm.



Gambar 5. Skema Alat Spektrofotometer UV-Vis (*double beam*) (Suhartati, 2017).

Pada spektrofotometer UV-Vis, sumber radiasi polikromatis berasal dari lampu deuterium untuk daerah ultraviolet dan lampu wolfram untuk daerah tampak. Cahaya kemudian dipisahkan oleh monokromator yang menggunakan prisma,

lensa, atau filter optik sehingga diperoleh panjang gelombang tertentu. Sampel ditempatkan dalam kuvet yang terbuat dari kuarsa atau gelas dengan lebar tertentu. Cahaya yang diteruskan selanjutnya diterima detektor, seperti detektor foto, detektor panas, atau fotodiode, yang mengubah energi cahaya menjadi sinyal listrik untuk dibaca sebagai nilai absorbansi (Suhartati, 2017).

Hubungan antara absorbansi dan konsentrasi mengikuti hukum Beer–Lambert yang dinyatakan dengan Persamaan (10).

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (10)$$

dengan (A) adalah absorbansi, (ε) koefisien serapan molar, (b) panjang lintasan cahaya, dan (c) konsentrasi larutan. Berdasarkan hubungan tersebut, perubahan nilai absorbansi pada panjang gelombang tetap menunjukkan perubahan konsentrasi zat warna dalam larutan (Suhartati, 2017).

Efektivitas pengolahan dinyatakan sebagai persentase degradasi warna berdasarkan perubahan nilai absorbansi yang dihitung menggunakan Persamaan (11).

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (11)$$

Persamaan persen degradasi digunakan untuk menunjukkan besarnya penurunan konsentrasi zat warna selama proses pengolahan yang diamati melalui perubahan nilai absorbansi, dengan (A_0) merupakan absorbansi awal limbah sebelum perlakuan ($t=0$ menit) yang merepresentasikan konsentrasi awal zat warna, sedangkan (A_t) adalah absorbansi pada waktu perlakuan tertentu dan selisih dari ($A_0 - A_t$) menyatakan penurunan absorbansi akibat proses degradasi, dan karena menurut hukum Lambert-Beer absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi, maka nilai persen degradasi menyatakan persentase berkurangnya konsentrasi zat warna dalam limbah sehingga semakin besar nilainya menunjukkan proses pengolahan semakin efektif (Amalia & Putri, 2025).

2.6.2 Oksigen Terlarut

Oksigen terlarut atau *Dissolved Oxygen* (DO) merupakan salah satu parameter utama dalam menilai mutu air dan kondisi kesehatan ekosistem perairan. Ketersediaan DO yang cukup sangat penting untuk menunjang kelangsungan hidup berbagai organisme akuatik seperti ikan, udang, dan makroinvertebrata. Penurunan

kadar oksigen terlarut dapat menimbulkan stres fisiologis hingga kematian massal organisme air serta menurunkan produktivitas perairan secara keseluruhan (Telaumbanua, 2025).

Oksigen terlarut adalah banyaknya gas O_2 (dalam miligram) yang larut di dalam air, yang nilai konsentrasi oksigen terlarut di perairan estuari dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain tekanan atmosfer, suhu, salinitas, tingkat turbulensi air, proses fotosintesis dan respirasi organisme, serta masuknya limbah ke dalam badan air (Madyawan et al., 2020).

Menurut (Stumm & Morgan, 1996) kelarutan oksigen di dalam air dikendalikan oleh kesetimbangan antara fase gas di atmosfer dan fase cair di perairan yang mengikuti Hukum Henry, dimana konsentrasi gas terlarut berbanding lurus dengan tekanan parsial gas di atas permukaan cairan ditunjukkan pada Persamaan (12).

$$C = k_H P \quad (12)$$

dengan (C) adalah konsentrasi oksigen terlarut, (k_H) konstanta Henry yang dipengaruhi suhu, dan (P) tekanan parsial oksigen di atmosfer. Berdasarkan prinsip tersebut, setiap suhu memiliki nilai kelarutan maksimum yang disebut sebagai oksigen terlarut jenuh (DO jenuh, C_s). Nilai DO aktual dalam air kemudian dinyatakan sebagai persentase kejenuhan terhadap kondisi setimbang seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (13).

$$DO(\%) = \frac{C}{C_s} \times 100 \quad (13)$$

sehingga konsentrasi oksigen terlarut dapat dihitung kembali menggunakan Persamaan (14).

$$C = \frac{DO(\%)}{100} \times C_s \quad (14)$$

Nilai DO jenuh sendiri merupakan fungsi temperatur yang diperoleh dari data eksperimen kelarutan oksigen di air tawar pada kesetimbangan udara-air. Semakin tinggi suhu, nilai konstanta Henry meningkat sehingga kelarutan oksigen menurun dan menyebabkan kadar DO berkurang. Oleh karena itu, parameter DO sering digunakan sebagai indikator kualitas air karena mencerminkan kemampuan perairan mendukung kehidupan organisme akuatik dan proses oksidasi alami.

Pengukuran kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*) dalam air dapat dilakukan secara langsung menggunakan alat DO meter yang bekerja berdasarkan sensor elektrokimia. Sensor ini mengukur difusi oksigen terlarut melalui membran menuju elektroda sehingga menghasilkan arus listrik yang besarnya sebanding dengan konsentrasi oksigen di dalam air. Metode ini banyak digunakan karena cepat, praktis, dan mampu memberikan hasil pengukuran secara real-time dibandingkan metode titrasi Winkler (Carvalho et al., 2021)

Dissolved Oxygen (DO) meter bekerja berdasarkan prinsip polarografi yang terjadi antara elektroda katoda dan anoda. Pada katoda diberikan potensial listrik negatif sehingga memicu berlangsungnya reaksi elektrokimia secara cepat antara molekul oksigen terlarut dalam air dengan permukaan katoda. Perhitungan konversi dari alat DO meter dilakukan dengan mengalikan nilai DO (%) dengan nilai oksigen terlarut jenuh pada suhu pengukuran, kemudian dibagi 100, sehingga diperoleh nilai DO dalam satuan mg/l. Persamaan perhitungan konversi dari alat DO meter dapat dilihat pada Persamaan (15).

$$DO \text{ (mg/l)} = \frac{DO \text{ (\%)}}{100} \times DO_{\text{jenuh}} \text{ (mg/l)} \quad (15)$$

dengan keterangan bahwa DO merupakan kadar oksigen terlarut dalam air (mg/l), DO (%) adalah nilai oksigen terlarut yang dibaca oleh DO meter dalam bentuk persen kejenuhan (%), dan DO_{jenuh} merupakan nilai oksigen terlarut maksimum pada suhu pengukuran (mg/l), sehingga perhitungan DO dilakukan dengan mengalikan DO (%) terhadap DO_{jenuh} kemudian dibagi 100 (Riadhi et al., 2017).

2.6.3 *Total Dissolved Solids (TDS)*

Total Dissolved Solids (TDS) adalah parameter yang menyatakan jumlah keseluruhan zat padat yang terlarut di dalam air, baik berupa mineral, garam anorganik, maupun senyawa organik berukuran sangat kecil. Zat-zat tersebut berada dalam bentuk ion atau molekul terlarut sehingga tidak dapat dipisahkan melalui proses penyaringan biasa. *Total Dissolved Solids (TDS)* adalah parameter kualitas air yang menunjukkan jumlah bahan anorganik dan organik yang terlarut dalam air, termasuk mineral, garam, logam, dan zat terlarut lainnya yang lolos melalui filtrasi berukuran 2 mikrometer atau lebih kecil, sehingga mencerminkan

karakteristik kimia larutan serta digunakan sebagai indikator umum kualitas air (Adjovu et al., 2023).

Rumus Total Dissolved Solids (TDS) air secara umum ditentukan dengan metode gravimetri menggunakan Persamaan (16).

$$TDS = \frac{(W_2 - W_1)}{V} \times 1.000.000 \quad (16)$$

dengan keterangan bahwa (W_2) merupakan berat cawan beserta residu setelah penguapan (gram), (W_1) adalah berat cawan kosong (gram), dan (V) adalah volume sampel air yang dianalisis (mL). Metode ini didasarkan pada pengukuran massa zat padat terlarut yang tertinggal setelah sampel diuapkan. Dalam praktik laboratorium, pengukuran TDS juga sering dilakukan menggunakan TDS meter digital, nilai TDS diperoleh melalui konversi dari konduktivitas listrik (EC) menjadi satuan ppm berdasarkan faktor konversi tertentu (Khofifah & Utami, 2022).

2.6.4 Daya Hantar Listrik

Daya hantar listrik (DHL) atau konduktivitas listrik adalah ukuran kemampuan suatu larutan untuk menghantarkan arus listrik yang ditentukan oleh jumlah ion-ion terlarut dalam air; semakin banyak ion terlarut yang terionisasi dalam larutan, semakin tinggi nilai daya hantar listriknya. Nilai DHL sering digunakan sebagai indikator karakteristik kimia air karena mencerminkan konsentrasi ion terlarut seperti garam dan senyawa anorganik dalam sampel kualitas air (Ramadhani, 2024).

Secara teoritis, daya hantar listrik berbanding lurus dengan jumlah ion terlarut dalam larutan. Hubungan tersebut dinyatakan melalui Persamaan (17).

$$\kappa = \sum c_i z_i^2 \lambda_i \quad (17)$$

dengan keterangan bahwa κ merupakan daya hantar listrik larutan yang dinyatakan dalam satuan S/cm atau $\mu\text{S/cm}$, (λ_i) adalah konduktivitas molar ion ke- i yang menyatakan kemampuan masing-masing ion dalam menghantarkan arus listrik ($\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$), dan (c_i) merupakan konsentrasi ion ke- i dalam larutan (mol/cm^3). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai daya hantar listrik suatu larutan dipengaruhi oleh jumlah serta jenis ion terlarut, sehingga semakin tinggi

konsentrasi ion-ion dalam larutan, maka semakin besar pula daya hantar listrik yang dihasilkan.

Berdasarkan persamaan tersebut, penurunan nilai DHL konsisten dengan TDS karena konduktivitas listrik dalam larutan bergantung pada konsentrasi dan mobilitas ion terlarut. Berkurangnya ion hasil proses oksidasi dan pengendapan menyebabkan kemampuan larutan menghantarkan arus listrik menurun.

2.6.5 Suhu

Suhu merupakan salah satu parameter fisika penting dalam penilaian kualitas air yang menunjukkan tingkat panas atau dingin suatu perairan, yang memengaruhi dinamika fisika dan kimia di dalamnya termasuk kelarutan gas seperti oksigen terlarut dan laju reaksi kimia; perubahan suhu dapat berdampak pada kemampuan air dalam mempertahankan kondisi lingkungan yang sesuai bagi organisme akuatik. Suhu menjadi indikator kunci karena suhu air dan oksigen terlarut saling berkorelasi serta berpengaruh pada kelangsungan hidup organisme di ekosistem air (Larance et al., 2025).

Suhu pada proses degradasi limbah batik ditentukan berdasarkan pengukuran langsung dan secara teoritis dinyatakan dengan Persamaan (18).

$$T = \frac{Q}{m \cdot c} \quad (18)$$

dengan keterangan bahwa (T) menyatakan perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$), (Q) adalah kalor yang diterima sistem (J), (m) merupakan massa sampel air limbah (kg), dan (c) adalah kalor jenis air ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$). Persamaan ini digunakan untuk menjelaskan perubahan suhu yang terjadi selama proses degradasi akibat energi yang dilepaskan oleh reaksi dan aktivitas plasma atau ozonasi, sementara nilai suhu aktual diperoleh dari pengukuran langsung menggunakan termometer atau sensor suhu.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini bertempat di Sukoharjo, Jawa Tengah untuk pengambilan sampel limbah batik dan tempat pengujian di Laboratorium Fisika Dasar Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2025 – Januari 2026.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Alat Penelitian

No.	Nama	Fungsi
1	Generator Ozon Plasma <i>corona</i>	Menghasilkan ozon melalui lucutan listrik bertegangan tinggi yang memecah molekul oksigen (O_2) di udara menjadi atom oksigen, yang selanjutnya bereaksi membentuk ozon (O_3).
2	Spektrofotometer UV–Vis	Mengukur nilai absorbansi larutan, yang menunjukkan konsentrasi zat terlarut seperti zat warna dalam limbah batik.
3	<i>Portable Multiparameter Water Quality Meter</i>	<ul style="list-style-type: none">• Mengukur kadar oksigen terlarut dalam air.• Mengukur kadar oksigen terlarut dalam air.• Mengukur jumlah total zat padat terlarut dalam air.• Mengukur daya hantar listrik larutan yang berkaitan dengan konsentrasi ion terlarut.• Mengukur suhu larutan atau air limbah.

Tabel 2. Bahan Penelitian

No.	Nama	Fungsi
1	500 ml Limbah Batik	Sampel atau objek uji untuk mengukur efektivitas pengolahan
2	500 ml Aquades	Pelarut dan media kontrol untuk perubahan parameter kualitas air

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini disusun untuk mengkaji efektivitas degradasi limbah cair batik menggunakan teknologi *multibubble-ozone* yang dihasilkan oleh plasma *corona*. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari persiapan alat dan bahan hingga analisis data hasil pengujian.

3.3.1 Persiapan Penelitian

Tahap persiapan penelitian diawali dengan studi literatur secara mendalam yang bertujuan untuk memperkuat landasan teoritis penelitian. Studi literatur dilakukan dengan menelaah jurnal ilmiah nasional dan internasional, buku teks, laporan penelitian, serta standar baku mutu lingkungan yang berkaitan dengan limbah cair industri batik. Kajian pustaka difokuskan pada karakteristik limbah batik, mekanisme degradasi senyawa organik dan zat warna, prinsip pembentukan plasma *corona*, pembangkitan ozon, serta peran gelembung mikro dalam meningkatkan efisiensi perpindahan massa ozon ke dalam fase cair.

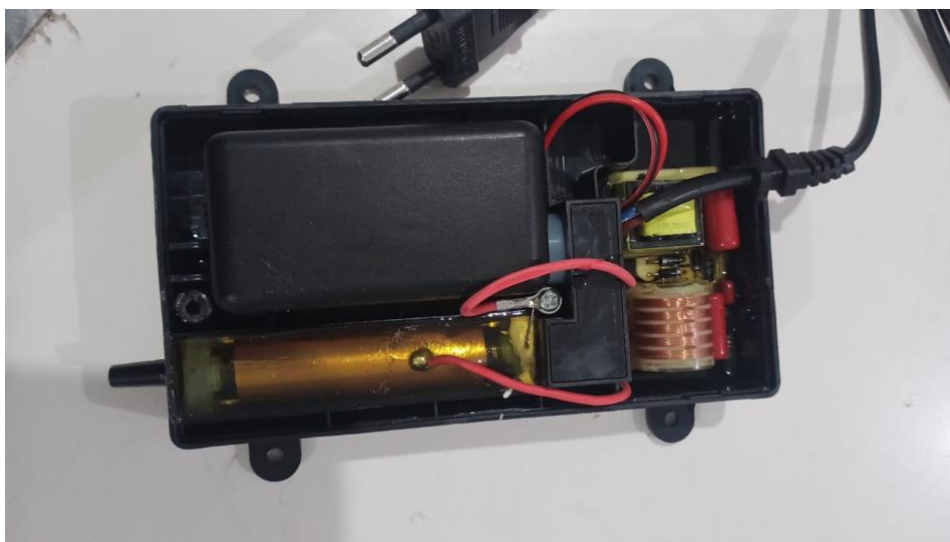
Selain itu, dilakukan identifikasi parameter kualitas air yang relevan untuk menggambarkan tingkat pencemaran limbah batik, meliputi absorbansi, oksigen terlarut, *Total Dissolved Solids* (TDS), daya hantar listrik (DHL), dan suhu. Penentuan parameter ini disesuaikan dengan tujuan penelitian serta ketersediaan alat ukur di laboratorium.

Tahap persiapan juga mencakup pengambilan sampel limbah cair batik dari salah satu industri batik di Sukoharjo, Jawa Tengah. Limbah diambil pada proses pewarnaan karena tahap ini menghasilkan limbah dengan kandungan zat warna dan bahan kimia paling tinggi. Sampel limbah disimpan dalam wadah tertutup berbahan plastik atau kaca yang bersih untuk mencegah kontaminasi dan perubahan

karakteristik limbah. Sebelum digunakan, limbah dihomogenkan dan diukur parameter awalnya sebagai data kondisi awal (*initial condition*).

3.3.2 Pelaksanaan Perlakuan Limbah dengan Plasma *Corona*

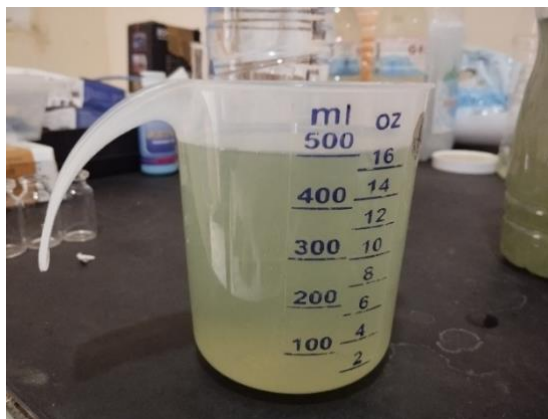
Penelitian difokuskan langsung pada proses pengolahan limbah cair batik menggunakan teknologi plasma *corona*. Sebelum alat dioperasikan, dilakukan persiapan awal dengan memeriksa kondisi sumber tegangan tinggi, elektroda plasma *corona*, selang penyalur gas ozon, reaktor pengolahan, serta sistem *multibubble-ozone*. Seluruh komponen dipastikan terpasang dengan baik dan tidak terdapat kebocoran.



Gambar 6. Generator Plasma *Corona* (Dokumentasi Pribadi)

Sumber daya listrik dihubungkan ke generator plasma *corona* dengan posisi saklar dalam keadaan mati. Tegangan tinggi kemudian dinyalakan secara bertahap hingga terbentuk lucutan plasma *corona* yang stabil pada elektroda. Udara lingkungan dialirkan ke dalam sistem sebagai sumber gas pembentuk ozon. Molekul oksigen diionisasi oleh plasma sehingga menghasilkan ozon yang selanjutnya dialirkan ke dalam reaktor melalui sistem *multibubble-ozone*.

Setelah alat stabil, sebanyak 500 ml limbah batik dimasukkan ke dalam gelas takar untuk dimasukkan ke wadah atau akuarium pengujian sampel yang telah terhubung dengan pipa dari alat plasma *corona*. Hal serupa dilakukan juga dengan perlakuan terhadap 500 ml *aquades* Gelas takar yang menampung limbah batik dan *aquades* ditunjukkan pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.



Gambar 7. 500 ml Limbah Batik (Dokumentasi Pribadi)



Gambar 8. 500 ml *Aquades* (Dokumentasi Pribadi)

Setelah plasma *corona* beroperasi stabil, waktu perlakuan ditetapkan sebagai menit ke-0. Sampel awal diambil sebelum perlakuan sebagai data kondisi awal. Proses ozonisasi dilanjutkan selama 60 menit dengan pengambilan sampel secara berkala setiap 10 menit, yaitu pada menit ke-0, 10, 20, 30, 40, 50, dan 60. Setiap sampel diambil menggunakan wadah bersih, disimpan dalam botol vial tertutup, dan diberi label sesuai waktu pengambilan.

Selama proses berlangsung, larutan limbah diaduk secara perlahan untuk memastikan distribusi ozon merata. Suhu larutan diamati untuk memastikan proses berlangsung pada kondisi non-termal. Setelah waktu perlakuan selesai, sumber tegangan tinggi dimatikan terlebih dahulu, kemudian aliran gas dihentikan secara perlahan. Sistem dibiarkan beberapa menit untuk memastikan tidak terdapat sisa ozon aktif sebelum alat dibersihkan.

Pengoperasian alat plasma *corona* dilakukan dengan memperhatikan keselamatan kerja. Ruangan dijaga memiliki ventilasi yang baik untuk mencegah akumulasi ozon berlebih.

3.3.3 Pengukuran Parameter Kualitas Air Limbah

Pengukuran parameter kualitas limbah dilakukan setelah melakukan pengoperasian sampel menggunakan plasma *corona*. Tiap sampel yang merupakan variasi ukuran gelembung dilakukan uji coba untuk menentukan absorbansi, oksigen terlarut, *Total Dissolved Solids* (TDS), daya hantar Listrik (DHL), dan suhu. Setiap parameter diukur menggunakan instrumen laboratorium yang sesuai dengan prosedur kerja masing-masing alat untuk menjamin keakuratan dan konsistensi data. Pengukuran absorbansi menggunakan alat spektrofotometer Uv-Vis seperti ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Alat Spektrofotometer UV–Vis (Dokumentasi Pribadi)

Sedangkan pengukuran oksigen terlarut, *Total Dissolved Solids* (TDS), daya hantar Listrik (DHL), dan suhu menggunakan satu alat yang sama bernama *Portable Multiparameter Water Quality Meter*, yang memiliki banyak elektroda pengujian parameter kualitas air, seperti ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Alat *Portable Multiparameter Water Quality Meter* (Dokumentasi Pribadi)

Adapun baku mutu kualitas air berdasarkan SNI yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Baku mutu kualitas air berdasarkan SNI

Parameter	Baku mutu
Absorbansi	0,2 – 0,8
Oksigen Terlarut	> 5 mg/l
TDS	500 mg/l
Daya Hantar Listrik	$\leq 1500 \mu\text{S/cm}$
Suhu	24 °C – 30 °C

3.3.3.1 Pengukuran Absorbansi Menggunakan Spektrofotometer UV–Vis

Pengujian absorbansi dilakukan untuk mengetahui perubahan konsentrasi zat warna limbah batik setelah proses pengolahan menggunakan plasma *corona multibubble-ozone*. Analisis dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 325–1100 nm. Sampel limbah diambil pada interval waktu pengolahan 0, 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit untuk dianalisis perubahan sifat optiknya. Sebelum pengukuran dilakukan, spektrofotometer dinyalakan dan dipanaskan selama ± 15 menit agar sumber cahaya stabil. Kuvet dibersihkan menggunakan akuades dan dikeringkan dengan tisu bebas serat untuk menghindari

gangguan pembacaan. Selanjutnya kuvet diisi akuades sebagai larutan blanko dan dimasukkan ke ruang sampel untuk proses kalibrasi baseline. Setelah kalibrasi selesai, sampel limbah dimasukkan ke dalam kuvet hingga sekitar tiga perempat volume kemudian bagian luar kuvet dibersihkan dari sidik jari atau tetesan air. Kuvet ditempatkan pada dudukan dengan posisi sisi transparan sejajar arah jalannya cahaya dan dilakukan pemindaian spektrum pada rentang panjang gelombang yang telah ditentukan sehingga diperoleh grafik hubungan panjang gelombang terhadap absorbansi. Prosedur ini diulangi untuk setiap variasi waktu perlakuan.

3.3.3.2 Pengukuran Oksigen Terlarut

Pengukuran oksigen terlarut atau *Dissolved Oxygen (DO)* dilakukan menggunakan *Portable Multiparameter Water Quality Meter* dengan memasang probe DO pada unit pembaca. Sensor DO bekerja berdasarkan difusi oksigen dari air melewati membran sensor menuju elektrolit internal sehingga menghasilkan sinyal listrik yang sebanding dengan konsentrasi oksigen terlarut di dalam sampel. Sistem alat akan mengonversi sinyal tersebut menjadi nilai persentase kejenuhan oksigen pada layar.

Probe dipasang hingga konektor rapat, alat dinyalakan dan dipilih mode DO. Kalibrasi dilakukan di udara bebas hingga pembacaan stabil, kemudian probe dibilas menggunakan akuades untuk menghilangkan sisa kontaminan. Sensor dicelupkan ke dalam sampel hingga seluruh membran terendam tanpa adanya gelembung udara yang dapat mengganggu proses difusi oksigen. Selama pengukuran sampel digerakkan perlahan sampai nilai stabil. Hasil pembacaan dicatat dalam persen (%) kemudian probe dibilas kembali sebelum digunakan pada pengukuran berikutnya. Pengukuran dilakukan pada setiap variasi waktu pengambilan sampel untuk mengetahui perubahan kadar oksigen akibat proses ozonasi.

3.3.3.3 Pengukuran *Total Dissolved Solids (TDS)*

Pengukuran TDS dilakukan menggunakan alat yang sama dengan mengganti probe menjadi probe konduktivitas (DHL/TDS). Sistem *multi-parameter* pada alat memungkinkan satu unit pembaca menerima jenis sinyal berbeda tergantung sensor

yang dipasang. Nilai TDS diperoleh dari hasil konversi konduktivitas listrik atau daya hantar listrik larutan menggunakan faktor konversi internal alat.

Setelah probe terpasang rapat, alat dinyalakan dan dipilih mode TDS. Sensor dibilas dengan akuades kemudian dicelupkan ke dalam sampel hingga batas pencelupan. Ion-ion terlarut di dalam air akan menghantarkan arus listrik antar elektroda sehingga alat dapat menghitung jumlah zat terlarut. Sampel digerakkan perlahan hingga pembacaan stabil kemudian nilai TDS dicatat dalam mg/l. Setelah pengukuran selesai probe dibilas kembali untuk mencegah kontaminasi antar sampel. Pengukuran dilakukan pada setiap waktu pengamatan untuk mengetahui perubahan jumlah zat padat terlarut selama proses ozonasi.

3.3.3.4 Pengukuran Daya Hantar Listrik (DHL)

Pengukuran daya hantar listrik (DHL) dilakukan menggunakan probe konduktivitas yang sama dengan pengukuran TDS dengan mengubah mode alat ke DHL. Prinsip pengukuran konduktivitas adalah pemberian beda potensial pada elektroda sehingga arus listrik yang mengalir sebanding dengan konsentrasi ion terlarut dalam larutan.

Probe dicelupkan ke dalam sampel hingga seluruh bagian elektroda terendam. Ion positif dan negatif dalam air bergerak menuju elektroda sehingga menghasilkan arus listrik yang kemudian diterjemahkan alat sebagai nilai konduktivitas. Pembacaan ditunggu hingga stabil lalu nilai dicatat dalam satuan $\mu\text{S}/\text{cm}$. Setelah pengukuran selesai probe dibilas menggunakan akuades sebelum digunakan kembali. Pengukuran dilakukan pada setiap variasi waktu untuk mengetahui perubahan kandungan ion selama proses pengolahan.

3.3.3.5 Pengukuran Suhu

Pengukuran suhu dilakukan menggunakan sensor temperatur yang terintegrasi pada probe konduktivitas *Portable Multiparameter Water Quality Meter*. Sensor temperatur bekerja berdasarkan perubahan resistansi material akibat perubahan temperatur yang kemudian diubah menjadi sinyal listrik oleh alat.

Probe dicelupkan langsung ke dalam sampel tanpa menyentuh dinding wadah. Perubahan suhu sampel akan langsung terbaca oleh sensor karena terjadi

kesetimbangan panas antara sensor dan cairan. Nilai suhu dicatat setelah pembacaan stabil dalam satuan °C. Pengukuran dilakukan bersamaan dengan parameter lain pada setiap waktu pengamatan untuk memastikan proses pengolahan berlangsung dalam kondisi non-termal.

3.3.4 Analisis Data

Data hasil pengukuran seluruh parameter kualitas limbah dianalisis secara kuantitatif dan deskriptif. Nilai parameter awal dibandingkan dengan nilai setelah perlakuan untuk menentukan efisiensi degradasi limbah batik.

Analisis data absorbansi dilakukan dengan mengamati perubahan nilai serapan cahaya sampel limbah batik yang diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang tertentu. Nilai absorbansi pada setiap variasi waktu ozonasi dibandingkan untuk mengetahui kecenderungan degradasi zat warna dalam limbah. Penurunan atau peningkatan nilai absorbansi dianalisis sebagai indikator terjadinya perubahan konsentrasi senyawa penyerap cahaya akibat proses ozonasi oleh plasma *corona*.

Analisis oksigen terlarut dilakukan dengan menggunakan data hasil pengukuran pada setiap waktu pengujian. Nilai DO yang diperoleh, baik dalam bentuk persen kejenuhan maupun hasil konversi ke satuan mg/l, dianalisis untuk melihat pengaruh waktu ozonasi terhadap peningkatan kandungan oksigen dalam air limbah. Kecenderungan perubahan nilai DO digunakan sebagai indikator efektivitas proses ozonasi dalam meningkatkan kualitas air.

Analisis *Total Dissolved Solids* (TDS) dilakukan berdasarkan nilai TDS yang diperoleh dari pengukuran menggunakan probe TDS atau perhitungan metode gravimetri. Perubahan nilai TDS pada setiap waktu ozonasi dianalisis untuk mengetahui pengaruh proses degradasi terhadap jumlah zat padat terlarut dalam limbah batik. Penurunan nilai TDS menunjukkan berkurangnya kandungan zat terlarut akibat proses pengolahan.

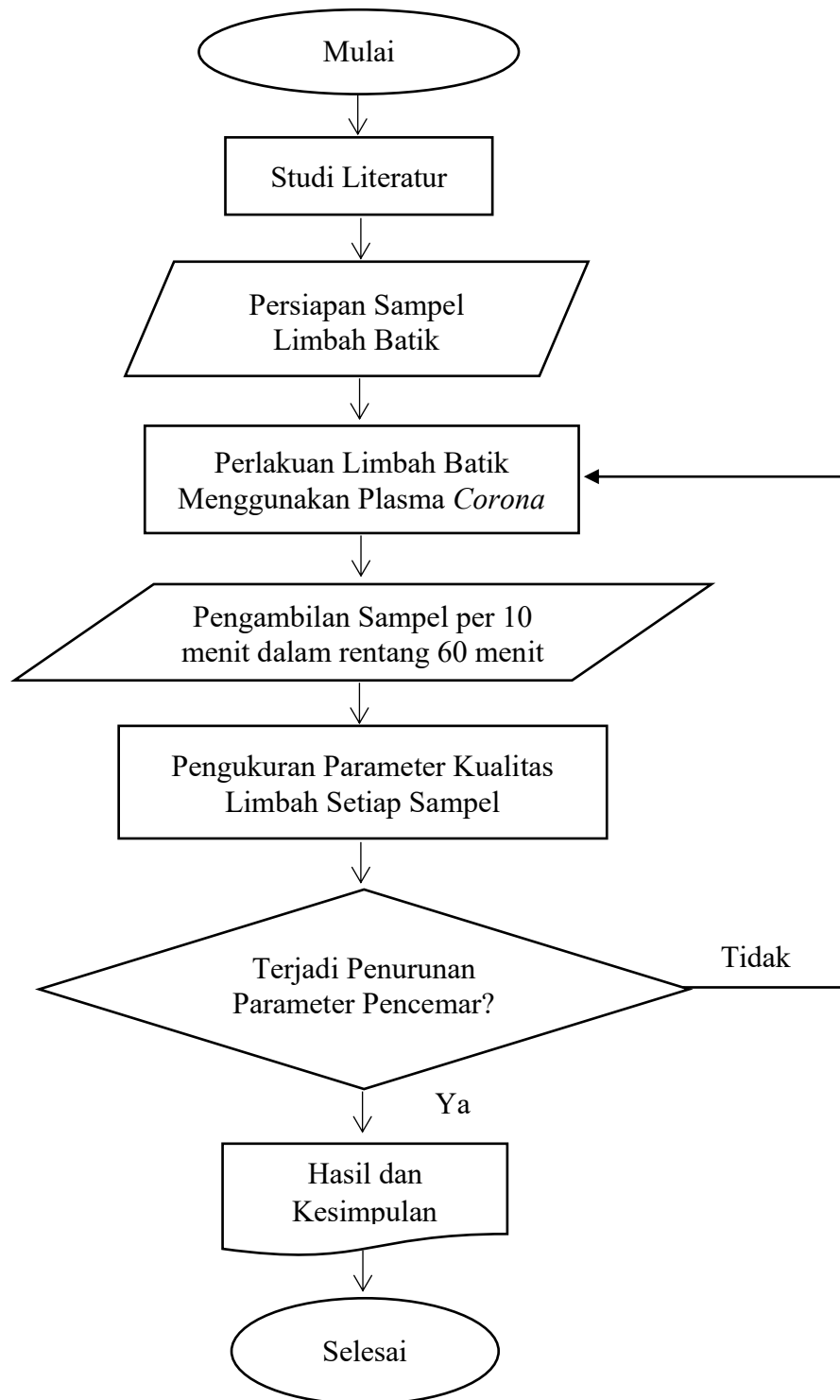
Analisis daya hantar listrik (DHL) dilakukan dengan mengevaluasi nilai konduktivitas listrik sampel pada setiap interval waktu ozonasi. Nilai DHL dianalisis sebagai indikator perubahan konsentrasi ion terlarut dalam air limbah selama proses degradasi. Hubungan antara nilai DHL dan waktu ozonasi dianalisis

untuk mengetahui dinamika pembentukan atau pengurangan ion akibat reaksi yang terjadi.

Analisis suhu dilakukan berdasarkan hasil pengukuran suhu sampel selama proses ozonasi berlangsung. Perubahan suhu dianalisis untuk mengetahui pengaruh energi yang dihasilkan oleh plasma *corona* terhadap kondisi termal limbah batik. Data suhu juga digunakan sebagai parameter pendukung karena perubahan suhu dapat memengaruhi nilai parameter kualitas air lainnya, seperti oksigen terlarut dan daya hantar listrik.

Sebagai kesimpulan analisis data, perubahan nilai absorbansi, oksigen terlarut, *Total Dissolved Solids* (TDS), daya hantar listrik (DHL), dan suhu menunjukkan bahwa proses ozonasi menggunakan plasma *corona* memberikan pengaruh terhadap karakteristik fisika dan kimia limbah batik. Kecenderungan perubahan masing-masing parameter terhadap waktu ozonasi digunakan sebagai dasar untuk menilai efektivitas proses degradasi yang terjadi. Hasil analisis ini menjadi acuan dalam menentukan kondisi pengolahan yang paling optimal serta mengevaluasi peningkatan kualitas air limbah batik setelah perlakuan plasma *corona*.

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 11. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan pembahasan dari bab sebelumnya dapat diambil kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Degradasi limbah batik terjadi melalui proses oksidasi lanjut yang dihasilkan plasma *corona*, di mana tegangan tinggi membentuk ozon (O_3) yang didispersikan menggunakan sistem *multibubble-ozone*. Ozon terurai menjadi radikal hidroksil yang menyerang struktur kromofor zat warna dan menguraikan senyawa organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana secara non-termal.
2. Setelah ozonisasi selama 60 menit, kualitas limbah batik mengalami peningkatan signifikan. Absorbansi menurun dari 0,13500 menjadi 0,01700 dengan efisiensi degradasi 87,41%. TDS turun dari 1089 mg/l menjadi 611 mg/l, DHL dari 1425 $\mu\text{S}/\text{cm}$ menjadi 908 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan DO meningkat dari 4,48 mg/l menjadi 5,90 mg/l, serta perubahan suhu relatif kecil (23,4 °C menjadi 22,6 °C).
3. Data UV-Vis pada panjang gelombang 519 nm menunjukkan penurunan absorbansi yang konsisten seiring waktu kontak, menandakan efektivitas sistem *multibubble-ozone* berbasis plasma *corona* dalam mendegradasi zat warna batik dan menurunkan kandungan polutan berwarna secara signifikan.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengoptimasi parameter operasional seperti tegangan plasma, laju alir gas, dan ukuran gelembung guna meningkatkan pembentukan radikal hidroksil dan efisiensi degradasi limbah batik. Selain itu, perlu dilakukan pengujian parameter kualitas air yang lebih lengkap seperti BOD,

COD, BOD, pH, dan TSS untuk memastikan bahwa hasil oksidasi tidak hanya memudarkan warna, tetapi benar-benar menurunkan tingkat pencemaran. Uji skala lebih besar (*scale-up*) serta kombinasi dengan metode biologis atau adsorpsi sebagai tahap lanjutan juga direkomendasikan agar kinerja sistem lebih stabil dan memenuhi baku mutu pembuangan limbah industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, A. F., Adirajasa, Y. Y., Yulianto, E., Sumariyah, S., Wardaya, A. Y., Sudarmanto, A., Budi, S., & Nur, M. (2022). Comparison of Ozone Production by Difference DBD Configuration Reactor and Dissolved Ozone in Water with Micro-Nano Bubble Technology. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 7(12), 1156–1162.
- Abdurrahman, A. F., Kusumandari, K., & Saraswati, T. E. (2025). Comparison of Emission Spectrum in Series and Parallel Configured Dielectric Barrier Discharge (DBD) Reactors and Its Application for Textile Wastewater Treatment. *Buletin Fisika*, 26(2), 205–3.
- Adirajasa, Y. Y., Abdurrahman, A. F., Yulianto, E., Sumariyah, S., Gunawan, G., Budi, S., & Nur, M. (2022). Study of Application Advanced Oxidation Process (AOP) using Nano-Micro Bubble Ozone for Batik Industry Waste Water Treatment. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 7(11).
- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 1–43.
- Amalia, D., & Putri, N. P. (2025). Unjuk Kerja Komposit Tio₂/Pani untuk Degradasi Pewarna Methylene Blue. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 14(2), 234–242.
- Amalia, S., Kholifah, Z. L., Juliani, N. S., & Kasmahidayat, Y. (2024). Analisis Proses Pembelajaran Membatik di Sanggar Batik Cikadu Tanjunglesung: Nilai-Nilai Budaya dan Nilai Pendidikan. *KOLEKTIF: Jurnal Pendidikan, Pengajaran, Dan Pembelajaran*, 1(2), 184–194.
- Andriani, Y., Lili, W., Sinurat, A. R., Gumilar, A. N., Noviyanti, A. R., Fauzi, M. R. N., & Gemilang, M. R. (2021). Pengolahan Limbah Organik Rumah Tangga Sebagai Bahan Baku Pakan Ikan. *Jurnal Penyuluhan Perikanan Dan Kelautan*, 15(3), 247–260.
- Apriyani, N. (2018). Industri Batik: Kandungan Limbah Cair dan Metode Pengolahannya. *MITL Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 3(1), 21–29.

- Athikoh, N., Gunawan, & Nur, M. (2021). Pengolahan Limbah Cair Tekstil dengan Proses Oksidasi Menggunakan Ozon Gelembung Mikro. *Arena Tekstil*, 36(2), 91–98.
- Belladonna, M., Nasir, N., & Agustomi, E. (2020). Perancangan Instalasi Pengolah Air Limbah (IPAL) Industri Batik Besurek di Kota Bengkulu. *Jurnal Teknologi*, 12(1), 1–7.
- Carvalho, A., Costa, R., Neves, S., Oliveira, C. M., & Bettencourt da Silva, R. J. N. (2021). Determination of Dissolved Oxygen in Water by the Winkler Method: Performance Modelling and Optimisation for Environmental Analysis. *Microchemical Journal*, 165.
- Chu, L.-B., Xing, X.-H., Yu, A.-F., Sun, X.-L., & Jurcik, B. (2008). Enhanced Treatment of Practical Textile Wastewater by Microbubble Ozonation. *Process Safety and Environmental Protection*, 86(5), 389–393.
- David, Faizal, F., & Hidayat, S. (2022). Studi Komputasi Efek Sonofisika dari Gelembung Mikro Terhadap Deformasi Lapisan Logam. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 06(01), 33–40.
- Fauzi, M. I. (2022). Pemaknaan Batik sebagai Warisan Budaya Tak Benda. *Journal of Indonesian Culture and Beliefs (JICB)*, 1(1), 43–52.
- Hannan, I. A., Witrie, S. E., & Adi, N. P. (2024). Dampak Pencemaran Air Akibat Limbah Industri Batik Printing di Kecamatan Pekalongan Utara Terhadap Kualitas Air Sungai. *Agustus*, 2(8), 34–42.
- Hidayatullah, A., Masyrurroh, A., & Akbari, T. (2023). Efektivitas Koagulan Lidah Buaya (Aloe Vera) dan Pac (Poly Aluminium Chloride) dalam Menurunkan Kadar Pencemar pada Limbah Cair Batik. *Jurnal Lingkungan Dan Sumberdaya Alam (JURNALIS)*, 6(1), 61–75.
- Ibadurrahman, A., & Muhibban. (2025). Pengembangan Ekonomi Kreatif Batik Tulis Kraton Sebagai Upaya Peningkatan Ekonomi Masyarakat Dalam Perspektif Ekonomi Islam. *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 3(1), 654–665.
- Indarwati, S. T., Wuryanti, S., & Prayogo, S. (2022). Pembuatan dan Pengujian Alat Pembangkit Lucutan Plasma Untuk Peningkatan Baku Mutu Air Limbah Tekstil. *Jurnal Energi*, 11(2), 43–47.
- Indrayani, L. (2018). Pengolahan Limbah Cair Industri Batik sebagai Salah Satu Percontohan IPAL Batik di Yogyakarta. *ECOTROPHIC*, 12, 173–184.
- Jannah, F. Z., Zuhri, M. S., & Mulyadi, E. (2021). Optimasi Kadar Ozon dalam Proses Disinfeksi Bakteri Coliform pada Pengolahan Air Minum. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(2), 59–65.
- Khamdi, A., & Aminah, S. (2012). Peranan Plasma Lucutan Pijar Korona Terhadap Penurunan Total Bakteri Susu Segar. *Jurnal Pangan Dan Gizi*, 03(05), 11–20.

- Khofifah, & Utami, M. (2022). Analisis kadar Total Dissolved Solid (TDS) dan Total Suspended Solid (TSS) Pada Limbah Cair dari Industri Gula Tebu. *IJCR-Indonesian Journal of Chemical Research*, 7(2), 43–49.
- Kusumandari, K., Saraswati, T. E., Wulandari, S. W., & Qusnudin, A. (2022). Atmospheric air plasma corona discharge for dye degradation of Indonesian batik wastewater. *Indian Journal of Physics*, 96(4), 1001–1008.
- Larance, S., Wang, J., Delavar, M. A., & Fahs, M. (2025). Assessing Water Temperature and Dissolved Oxygen and Their Potential Effects on Aquatic Ecosystem Using a SARIMA Model. *Environments - MDPI*, 12(1), 1.
- Liku, J. E. A., Mulya, W., Sipahutar, M. K., & Sari, I. P. (2022). Mengidentifikasi Sumber Pencemaran Air Limbah di Tempat Kerja. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 1(1), 14–19.
- Madyawan, D., Hendrawan, I. G., & Suteja, Y. (2020). Pemodelan Oksigen Terlarut (Dissolved Oxygen/DO) di Perairan Teluk Benoa. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(2), 270–280.
- Martini, S., Yuliwati, D., Martini, S., Yuliwati, E., & Kharismadewi, D. (2020). Pembuatan Teknologi Pengolahan Limbah Cair Industri. *Distilasi*, 5(2), 26–33.
- Martiyah, Roziqin, & Rosdiana. (2020). Penegakan Hukum Terhadap Pencemaran Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit di Kabupaten Penajam Paser Utara Berdasarkan Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Jurnal Lex Suprema*, 2(1), 147–167.
- Moris, A. O., Nur, M., Setyatwan, H., & Setiawan, I. (2022). Pengaruh Pemaparan Gas Ozon terhadap Kadar Air, Lignin, Selulosa dan Hemiselulosa pada *Azolla pinnata*. *Jurnal Ilmu Ternak Universitas Padjadjaran*, 22(1), 1–5.
- Murniati, T., & Muljadi. (2013). Pengolahan Limbah Batik Cetak dengan Menggunakan Metode Filtrasi-Elektrolisis untuk Menentukan Efisiensi Penurunan Parameter COD, BOD, dan Logam Berat (Cr) setelah Perlakuan Fisika-Kimia. *EKUILIBRIUM*, 12(1), 27–36.
- Nanda, M. F., Maulanah, S., Hidayah, T. N., Taufiqurrahman, A. M., & Radianto, D. O. (2024). Analisis Pentingnya Pengelolaan Limbah Terhadap Kehidupan Sosial Bermasyarakat. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(2), 97–107.
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Aziz, M. (2023). How to Calculate and Measure Solution Concentration using Uv-Vis Spectrum Analysis: Supporting Measurement in the Chemical Decomposition, Photocatalysis, Phytoremediation, and Adsorption Process. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8(2), 345–362.

- Naomi, A., Pertiwi, J., Permatasari, P. A., Dini, S. N., & Saefullah, A. (2018). Keefektifan Spektrum Cahaya Terhadap Pertumbuhan Tanaman Kacang Hijau (*Vigna Radiata*). *GRAVITY*, 4(2), 93–102.
- Nugraha, M. K., Muhlisin, Z., & Triadyaksa, P. (2019). Karakterisasi Plasma Lucutan Pijar Korona Positif pada Kondisi Atmosfer dengan Konfigurasi Elektroda Titik Bidang dan Pengaruhnya Terhadap Kain Sutra Alam (*Bombyx Mori*). *Arena Tekstil*, 34(1), 25–34.
- Nur, M., Yossa Adirajasa, Y., Yulianto, E., & Sumariyah, S. (2023). *Teknologi Gelembung Nano-Mikro Ozon dalam Pengolahan Air Limbah Batik*. Penerbit Adab.
- Purwadi, A., Usada, W., Puslitbang, S., & Maju -Batan Yogyakarta, T. (2002). Penentuan Produk Ozon Optimum pada Ozonizer Plasma. *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir*, 15–24.
- Purwaningrum, S. I. (2024). Analisis Pengelolaan Air Limbah Batik Sebagai Upaya Penerapan Produksi Bersih Kota Jambi. *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, 7(1), 45–55.
- Putra, V. G. V., & Susanto, T. (2021). Sebuah Tinjauan Mengenai Penerapan Fisika Plasma pada Bidang Tekstil. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 32(1), 1–18.
- Putri, L. E. (2017). Penentuan Konsentrasi Senyawa Berwarna KMnO₄ dengan Metoda Spektroskopi UV Visible. *NATURAL SCIENCE JOURNAL*, 3(1), 391–398.
- Ramadhani, G. (2024). Analisis Kualitas Air pada Sungai Mejing dan Kolam Tadah Hujan Menggunakan Parameter Fisika di Desa Wisata Nganggri, Sleman. *Jurnal Ilmu Perairan (Aquatic Science)*, 12(1), 89–95.
- Riadhi, L., Rivai, M., & Budiman, F. (2017). Sistem Pengaturan Oksigen Terlarut Menggunakan Metode Logika Fuzzy Berbasis Mikrokontroler Teensy Board. *JURNAL TEKNIK ITS*, 6(2), 330–334.
- Roshanti, F., Sidhi, S. D. P., Kamal, S., Deendarlianto, & Indarto. (2023). Pengaruh Sudut Puntiran Baffle pada Microbubble Generator Venturi terhadap Karakteristik Gelembung Mikro. *TALENTA Conference Series: Energy & Engineering*, 698–707.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *AQUATIC CHEMISTRY*. John Wiley & Sons, Inc.
- Suharson, A. (2021). Batik In The Global Cultural Constellation Restore Aesthetic, Ethical, And Religious Values. *Prosiding Seminar Nasional Industri Kerajinan Dan Batik Membangun Industri Kerajinan Dan Batik Yang Tangguh Di Masa Pandemi Yogyakarta*, 1–17.

- Suhartati, T. (2017). *Dasar-Dasar Spektrofotometri Uv-Vis dan Spektrometri Massa untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. CV. Anugrah Utama Raharja.
- Suslick, K. S., Eddingsaas, N. C., Flannigan, D. J., Hopkins, S. D., & Xu, H. (2018). The Chemical History of a Bubble. *Accounts of Chemical Research*, *51*(9), 2169–2178.
- Telaumbanua, M. (2025). Peraut : Pengaruh Oksigen Terlarut (Do) dalam Budidaya Perairan. *PERAUT*, *2*(1), 200–206.
- Widiastuti, F., Erida, Setiawati, R., Yuniarti, Y., & Hendriyaldi. (2024). *Batik Sebagai Identitas Lokal: Mengangkat Kembali Motif-Motif Khas* KEYWORD *Batik Motif Sale value Pangkal Babu*. *4*(6), 141–147.
- Wijayanti, Lucky. (2012). *Teknik batik*. Fakultas Seni Rupa, Institut Kesenian Jakarta.