

Pengaruh Variasi Elektroda untuk Penurunan Kadar TSS dan Kekeruhan Limbah Tekstil Batik Dalam Metode Elektrokoagulasi

Audyna Ayu Ramadhani*, Tuhu Agung Rachmanto

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: audyna.ramadhani.ar@gmail.com

Diterima: 6 November 2025

Disetujui: 18 November 2025

Abstract

The production of batik textiles causes serious environmental problems due to the direct discharge of wastewater into water bodies. The wastewater contains harmful substances that affect both living organisms and the environment. One effective treatment method is electrocoagulation, which combines electrochemical and flocculation-coagulation processes for wastewater treatment. This method reduces pollutant loads by varying electrode types. In this study, the electrodes used are Aluminum (Al), Iron (Fe), Copper (Cu), and Zinc (Zn) with contact times of 30, 60, 90, and 120 minutes. The electrodes are connected to a power supply and placed in an electrocoagulation reactor. The combination of electrode type and contact time significantly affects TSS (Total Suspended Solids) and turbidity. Longer contact time (30–120 minutes) leads to lower TSS and turbidity values due to the formation of $\text{Al}(\text{OH})_3$ flocs, which adsorb suspended particles. The Al–Zn pair shows the best performance as it forms galvanic microcells that enhance metal ion dissolution. Statistical analysis reveals a strong correlation between TSS and turbidity, indicating effective treatment. Optimizing contact time improves electrocoagulation efficiency for batik wastewater treatment.

Keywords: batik wastewater; electrocoagulation; electrode variation; wastewater treatment efficiency

Abstrak

Produksi tekstil batik memberikan banyak permasalahan lingkungan akibat dari pembuangan limbah langsung ke badan air. Kandungan dari Limbah industri batik sangat berdampak bagi makhluk hidup dan lingkungan. Metode pengolahan yang dapat dilakukan untuk menanggulangi limbah tersebut dengan Elektrokoagulasi yang merupakan gabungan antara proses elektrokimia dan flokulasi-koagulasi dalam pengolahan air limbah. Elektrokoagulasi digunakan untuk mengurangi beban pencemar dari limbah Industri Batik dengan memvariasikan jenis elektroda. Pada penelitian ini, Elektroda yang akan digunakan adalah Aluminium (Al), Besi (Fe), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn). Variasi waktu yang digunakan adalah 30 menit, 60 menit, 90 menit dan 120 menit. Elektroda (anoda dan katoda) di sambungkan ke power supply dan rangkaian tersebut kemudian dimasukkan ke dalam reaktor elektrokoagulasi Kombinasi jenis elektroda dan waktu kontak berpengaruh terhadap perubahan nilai TSS dan Kekeruhan. Semakin lama waktu kontak (30–120 menit), nilai TSS dan kekeruhan menurun akibat pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang mengadsorpsi partikel tersuspensi. Pasangan Al–Zn paling efektif karena membentuk mikrosel galvanik yang mempercepat pelarutan ion logam. Hasil uji statistik menunjukkan adanya korelasi yang sangat kuat antara parameter TSS dan kekeruhan. Pada penelitian, optimalkan variabel waktu kontak untuk peningkatan efisiensi elektrokoagulasi.

Kata Kunci: limbah batik; elektrokoagulasi; variasi elektroda; efisiensi pengolahan air limbah

1. Pendahuluan

Peningkatan produksi tekstil batik dalam beberapa tahun terakhir telah memberikan kontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi, tetapi di sisi lain juga menimbulkan masalah lingkungan yang cukup serius. Salah satu masalah utama adalah pembuangan limbah cair yang dihasilkan dari produksi batik langsung ke dalam air tanpa mengolahnya terlebih dahulu. Pada proses pembuatan batik, banyak menggunakan bahan-bahan kimia dan air. Air limbah dari proses pembuatan batik pada umumnya bersifat basa yang ditandai dengan warna dan pH yang tinggi (10 – 12,5) serta memiliki kandungan garam tinggi [1]. Situasi ini berpotensi mengganggu kualitas ekosistem perairan dan membawa dampak negatif bagi kesehatan manusia, seperti iritasi kulit hingga risiko mengalami kanker akibat paparan bahan kimia berbahaya. Mayoritas industri batik berada dalam skala kecil atau berupa usaha rumahan dengan volume limbah yang tidak terlalu besar, tetapi menyebar di berbagai lokasi. Oleh karena itu, pengolahan limbah sebaiknya dilakukan secara bersamaan dengan sumber pencemar untuk meminimalkan dampak negatifnya.

Elektrokoagulasi merupakan metode alternatif gabungan antara proses elektrokimia dan flokulasi-koagulasi dalam pengolahan air limbah. Elektrokoagulasi menggunakan arus listrik yang dialirkan ke elektroda dan bereaksi membentuk koagulan untuk mengendapkan polutan pencemar membentuk flok-flok [2]. Proses elektrokoagulasi terbentuk melalui pelarutan logam dari anoda yang kemudian berinteraksi secara simultan dengan ion hidroksida dan gas hidrogen yang dihasilkan dari katoda[3]. Ada beberapa faktor yang memengaruhi elektrokoagulasi salah satu nya adalah jenis elektroda. Elektroda mempunyai dampak terhadap proses elektrokoagulasi, termasuk jenis elektroda yang digunakan, jarak antar elektroda selama proses berlangsung, luas permukaan elektroda, serta ketebalan plat elektroda. Jarak antar elektroda yang paling efektif untuk menurunkan kadar COD, kekeruhan, dan TSS adalah 1,5 cm dan 3 cm. Jika jarak elektroda terlalu rapat, maka koagulan yang terbentuk hanya terletak di sekitar dan tidak mampu menjangkau seluruh partikel padat yang tersuspensi. Sebaliknya, jika jarak elektroda terlalu jauh, lintasan aliran arus listrik menjadi lebih pendek, sehingga efisiensi konsentrasi TSS cenderung menurun [4].

Luas permukaan elektroda juga memengaruhi efisiensi proses elektrokoagulasi karena semakin besar jumlah pasangan elektroda, maka semakin luas pula luas permukaannya, dan semakin cepat proses oksidasi yang terjadi. Jika luas penampang (A) dibuat tetap, maka semakin kecil jarak antar elektroda (l), semakin kecil pula hambatan (R) yang muncul dalam reaksi. Elektroda memiliki berbagai jenis berdasarkan urutan volta. Deret elektrokimia atau deret volta adalah susunan logam yang ditentukan berdasarkan nilai potensial elektroda standar, yang mencerminkan kemampuan logam tersebut untuk beraksi oksidasi atau reduksi. Sel Volta adalah jenis sel elektrokimia yang menghasilkan energi listrik melalui reaksi kimia yang terjadi secara spontan [5]. Pada penelitian ini menggunakan variasi elektroda Aluminium (Al), Besi (Fe), Seng (Zn), dan Tembaga (Cu) untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda, dan energi, dengan tujuan meningkatkan efektivitas pengolahan limbah batik melalui proses elektrokoagulasi.

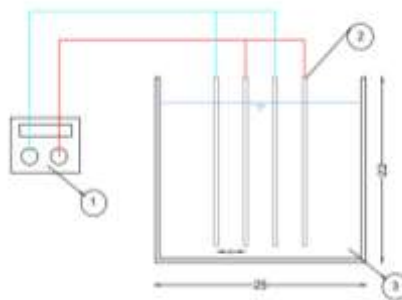
2. Metode Penelitian

Penyiapan Elektroda

Dalam penelitian ini, elektroda yang digunakan adalah Aluminium (Al), Besi (Fe), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn). Sebelum digunakan, permukaan elektroda dicuci dengan air suling lalu dikeringkan. Setelah itu, elektroda diatur menjadi anoda (elektroda positif) dan katoda (elektroda negatif). Jarak antara kedua elektroda adalah 3 cm, kemudian elektroda disambungkan ke power supply. Rangkaian tersebut kemudian dimasukkan ke dalam reaktor. Sebelumnya, dilakukan analisis awal terhadap air limbah untuk mengetahui kandungan parameter-parameter yang terdapat di dalamnya.

Proses Elektrokoagulasi

Proses Elektrokoagulasi dilakukan dengan analisis awal terhadap air limbah untuk mengetahui kadar parameter yang terdapat di dalamnya melalui proses pengukuran TSS dan kekeruhan. Selanjutnya, air limbah dimasukkan ke dalam bak penampung. Elektroda dihubungkan dengan sumber daya listrik, dengan anoda terhubung ke kutub positif dan katoda ke kutub negatif. Setelah persiapan selesai, nyalakan sumber daya listrik, periksa kembali arus yang terbaca dan alirkan tegangan sesuai dengan nilai yang ditentukan. Variasi durasi waktu dalam penelitian ini adalah 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit. Hasil dari percobaan tersebut kemudian dianalisis kembali untuk mengetahui persentase kandungan limbah yang berhasil dihilangkan.



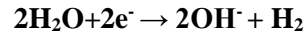
Gambar 1. Reaktor Elektrokoagulasi
 Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Analisis Data

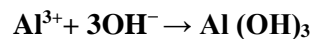
Analisis data yang digunakan pada penelitian efektifitas penurunan kandungan TSS dan Kekeruhan pada limbah cair industri tekstil batik yaitu dengan menggambarkan atau menjelaskan hasil yang didapatkan selama penelitian. Hasil penelitian secara langsung dibandingkan dengan baku mutu limbah menurut Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 serta disajikan dalam bentuk gambar serta grafik [6]. Analisis hubungan antar parameter TSS dan Kekeruhan juga dilakukan dengan menggunakan aplikasi Minitab serta disajikan dalam bentuk grafik.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada sistem elektrokoagulasi, katoda berperan dalam reaksi reduksi yang menghasilkan ion hidroksida dan gas hidrogen melalui reaksi berikut :



Gas hidrogen ini membantu mengangkat flok hasil koagulasi sehingga memudahkan pemisahan TSS [7]. Sedangkan Reaksi pada anoda adalah sebagai berikut :



Ion Al^{3+} kemudian bereaksi dengan air dan OH^- untuk membentuk flok polimerik $\text{Al}(\text{OH})_3$. Flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ ini mengikat partikel TSS (misalnya koloid, organik), menyebabkan koagulasi dan sedimentasi, yang menurunkan kadar TSS. Kinerja sel secara keseluruhan bergantung pada gaya penggerak elektrokimia, yang diukur dengan selisih potensial (ΔE) antara anoda dan katoda [7].

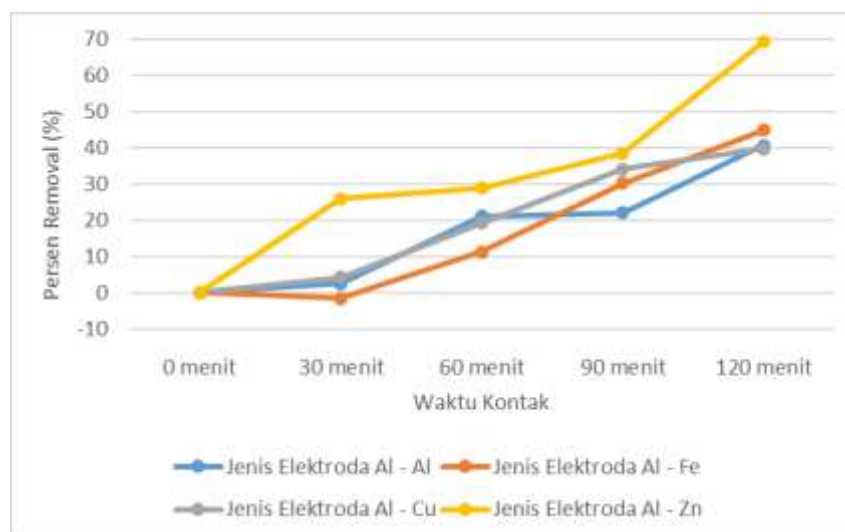
3.1 Pengaruh Jenis Katoda Terhadap Parameter TSS

Hasil dari Pengujian konsentrasi Total Suspended Solid (TSS) yang dilakukan pada limbah tekstil batik dengan menggunakan metode elektrokoagulasi pada variasi jenis katoda, yaitu Al-Al, Al-Fe, Al-Cu, dan Al-Zn, dengan Aluminium sebagai anoda tunggal disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Persen Removal Parameter TSS

Waktu Kontak (td)	Jenis Elektroda			
	Al - Al	Al - Fe	Al - Cu	Al - Zn
0 menit	924	924	924	924
30 menit	900	980	884	684
60 menit	728	820	746	656
90 menit	720	644	608	568
120 menit	548	508	556	284

Sumber : Hasil Penelitian, 2025



Gambar 2. Persentase Penurunan Kadar TSS

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Kinerja sel elektrokoagulasi bergantung pada perbedaan potensial (ΔE) antara anoda dan katoda. Pada penggunaan katoda aluminium, efisiensi penyisihan meningkat dari 2,6% (30 menit) menjadi 40,7% (120 menit) seiring peningkatan pembentukan ion Al^{3+} dan flok. Karena kedua elektroda berasal dari logam yang sama, tidak terdapat beda potensial alami sehingga seluruh energi diperoleh dari sumber eksternal [8]. Kondisi ini menurunkan laju pelarutan aluminium, sedangkan pembentukan lapisan oksida pada anoda turut mengurangi efisiensi pada waktu reaksi yang lebih lama [9].

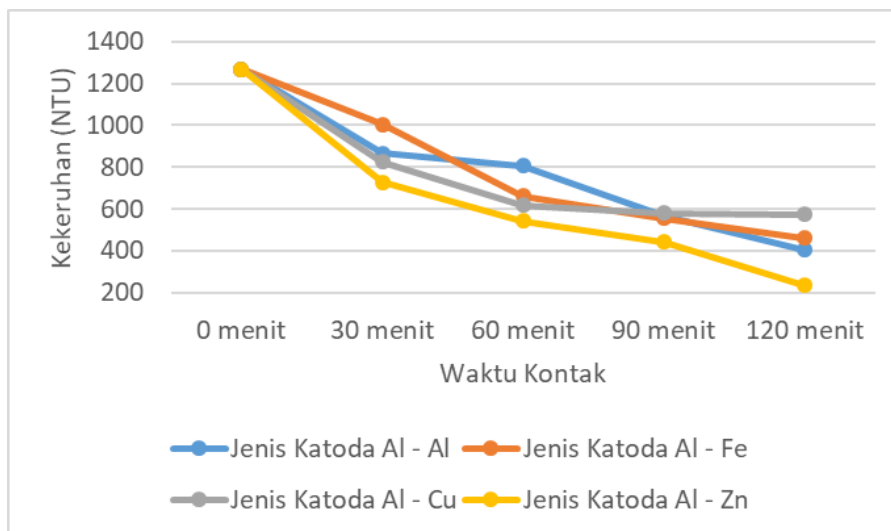
Pada penggunaan katoda besi (Fe), efisiensi penyisihan menunjukkan peningkatan pada waktu kontak 0 hingga 30 menit. Pada tahap awal, terbentuk flok halus yang belum stabil serta sebagian partikel tersuspensi masih mengendap kembali ke dalam larutan. Seiring bertambahnya waktu kontak hingga 60–120 menit, pelepasan ion Al^{3+} dan Fe^{2+} meningkat, sehingga proses pembentukan flok menjadi lebih efektif. Flok yang dihasilkan berukuran lebih besar dan lebih berat, sehingga mudah mengendap dan menurunkan nilai TSS secara signifikan. Peningkatan waktu kontak pada elektrokoagulasi dengan elektroda Fe memperbesar ukuran flok dan meningkatkan efisiensi penyisihan kekeruhan. Secara umum, efisiensi elektrokoagulasi dipengaruhi oleh durasi kontak serta kestabilan flok yang terbentuk selama proses berlangsung [10].

Pada penggunaan katoda seng (Zn), terjadi penurunan kadar partikel tersuspensi yang signifikan dari 684 mg/L pada menit ke-30 menjadi 284 mg/L pada menit ke-120, menunjukkan efektivitas tinggi Zn dalam proses pengendapan partikel. Kinerja ini dihasilkan melalui dua mekanisme utama, yaitu pembentukan gas hidrogen dan endapan hidroksida seng. Reaksi reduksi air menghasilkan gelembung hidrogen halus yang menempel pada partikel tersuspensi dan mempercepat proses flotasi, sedangkan ion Zn^{2+} yang terbentuk bereaksi dengan ion OH^- membentuk $Zn(OH)_2$ yang berperan sebagai koagulan tambahan [11]. Selain itu, *over potensial* hidrogen yang tinggi pada Zn menghasilkan gelembung berukuran kecil yang efektif dalam mengikat partikel halus, meningkatkan efisiensi penyisihan TSS [12].

Pada variasi elektroda Al–Cu, penurunan nilai TSS berlangsung signifikan dari menit ke-30 hingga menit ke-120, menandakan efektivitas awal yang cukup tinggi. Logam tembaga (Cu) memiliki potensial reduksi standar sebesar +0,34 V, tertinggi di antara logam Al, Zn, dan Fe, sehingga sulit teroksidasi atau larut ke dalam larutan. Perannya sebagai katoda yang stabil dan konduktif mendukung proses oksidasi pada anoda Al tanpa menambah ion logam ke sistem. Namun, terbentuknya gelembung hidrogen berukuran lebih besar cenderung mengangkat flok kasar dan mengurangi efisiensi pengikatan partikel halus. Selain itu, lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan Cu menghambat reaksi evolusi hidrogen (HER), sehingga laju pembentukan H_2 menurun dan efisiensi penyisihan TSS sedikit lebih rendah dibandingkan elektroda Zn atau Fe [11].

3.2 Pengaruh Jenis Katoda Terhadap Parameter Kekeruhan

Hasil pengujian konsentrasi kekeruhan yang dilakukan pada limbah tekstil batik dengan menggunakan metode elektrokoagulasi pada variasi jenis katoda, yaitu Al–Al, Al–Fe, Al–Cu, dan Al–Zn, dengan Aluminium sebagai anoda tunggal disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Persentase Penurunan Kadar TSS
 Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan katoda aluminium menyebabkan penurunan kekeruhan secara bertahap, dari 864,4 NTU pada waktu kontak 30 menit menjadi 403,1 NTU pada 120 menit. Penurunan ini terjadi akibat pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang efektif mengadsorpsi partikel tersuspensi dan koloid. Secara teoritis, ion Al^{3+} yang dilepaskan dari anoda bereaksi dengan ion OH^- untuk membentuk flok padat yang mampu menjebak partikel halus, sehingga menurunkan tingkat kekeruhan [13] [14].

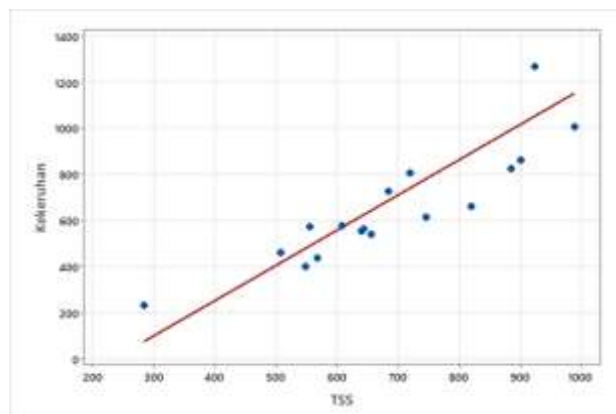
Pada penggunaan katoda besi, kekeruhan menurun signifikan dari 1005 NTU menjadi 460,6 NTU. Ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} yang dihasilkan selama proses elektrokoagulasi membentuk flok $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang memiliki kapasitas tinggi dalam mengendapkan partikel halus, sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan kekeruhan terutama pada waktu kontak yang lebih lama [10].

Katoda tembaga menunjukkan penurunan kekeruhan dari 824,4 NTU menjadi 572,5 NTU, namun kecepatannya relatif lebih lambat dibandingkan katoda Fe dan Zn. Ion Cu^{2+} yang terbentuk menghasilkan flok dengan stabilitas rendah, sehingga efektivitas penurunan kekeruhan tidak setinggi logam lain [11]. Meskipun demikian, hasil akhir tetap menunjukkan penurunan yang cukup signifikan hingga akhir proses.

Sementara itu, penggunaan katoda seng memberikan hasil terbaik, dengan penurunan kekeruhan dari 728,8 NTU menjadi 235,6 NTU. Reaksi elektrokimia pada elektroda seng menghasilkan ion Zn^{2+} yang bereaksi membentuk $\text{Zn}(\text{OH})_2$, berperan sebagai koagulan tambahan dan memperkuat proses pengendapan partikel tersuspensi. Kombinasi mekanisme koagulasi dan flotasi menyebabkan efisiensi penyisihan kekeruhan menjadi paling tinggi [12].

3.3 Hubungan antara Parameter TSS dan Kekeruhan

Analisis hubungan antara parameter TSS (*Total Suspended Solid*) dan kekeruhan dilakukan untuk memahami keterkaitan antar parameter kualitas air selama proses pengolahan. Uji statistik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Minitab berdasarkan metode regresi linear sederhana.



Gambar 4. Hubungan antara Parameter TSS dan Kekeruhan
Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Hasil analisis menggunakan perangkat lunak Minitab menunjukkan nilai koefisien determinasi $R^2 = 78,91\%$, yang mengindikasikan bahwa sekitar 79% variasi nilai kekeruhan dapat dijelaskan oleh perubahan kadar Total Suspended Solids (TSS). Nilai p-value = 0,000 ($< 0,05$) menegaskan bahwa hubungan antara TSS dan kekeruhan signifikan secara statistik di mana peningkatan konsentrasi TSS berbanding lurus dengan kenaikan nilai kekeruhan air. Hubungan positif ini memperlihatkan bahwa semakin besar jumlah partikel tersuspensi dalam air, semakin tinggi pula hamburan cahaya yang terjadi, sehingga meningkatkan tingkat kekeruhan. Sebaliknya, penurunan kadar TSS selama proses elektrokoagulasi menyebabkan penurunan nilai kekeruhan. Temuan ini sesuai dengan teori bahwa partikel tersuspensi merupakan penyebab utama kekeruhan, karena berperan dalam difraksi dan penyerapan cahaya di dalam air [15]. Oleh karena itu, pengendalian konsentrasi TSS menjadi faktor penting dalam menurunkan kekeruhan dan meningkatkan efektivitas pengolahan limbah cair [10].

4. Kesimpulan

Kombinasi jenis elektroda dan waktu kontak berpengaruh signifikan terhadap perubahan nilai Total Suspended Solids (TSS) dan kekeruhan. Semakin lama waktu kontak (30–120 menit), nilai TSS dan kekeruhan menurun akibat pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang mampu mengadsorpsi partikel tersuspensi,

sedangkan nilai pH dan daya hantar listrik (DHL) meningkat karena terbentuknya ion OH^- dan Al^{3+} selama proses berlangsung. Metode elektrokoagulasi terbukti efektif menurunkan TSS dan kekeruhan hingga 60–70%, dengan efisiensi tertinggi diperoleh pada waktu kontak 120 menit dan kombinasi elektroda Al–Zn yang membentuk mikrosel galvanik sehingga mempercepat pelarutan ion logam. Hasil analisis statistik juga menunjukkan adanya korelasi positif yang sangat kuat antara TSS dan kekeruhan, menandakan bahwa penurunan TSS berbanding lurus dengan penurunan tingkat kekeruhan.

5. Referensi

- [1] E. Septiyani, “Penyisihan Kandungan Sulfida dan Warna dalam Limbah Industri Batik Berbahan Pewarna Dasar Remazol Red RB.C.I. Reactive Red 198,” *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 1, 2017.
- [2] P. D. Riyanto, *Elektrokimia Dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [3] A. Sulistyaningsih dan T. A. Rachmanto, “Fotokatalis Pada Proses Degradasi Limbah Batik,” vol. 1, no. 1, hlm. 9–15, 2020.
- [4] Nugraha, A., I. Amri, and I. Hs. "Pengaruh pola dan jarak elektroda pada proses elektrokoagulasi limbah cair industri tahu." *Jom FTEKNIK* 5.2 (2018): 1-5.
- [5] R. H. . Petrucci, *General chemistry : principles and modern applications*. Pearson Canada, 2011.
- [6] Gubernur Jawa Timur, “Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri Dan/Atau Kegiatan Usaha Lainnya,” 2013, hlm. 10.
- [7] Joning, Marthen, Lydia Melawaty, and Rosalia Sira Sarungallo. "Metode Elektrokoagulasi Untuk Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Yang Mengandung Logam-Logam Berat." *Paulus Chem Engineering Journal* 1.1 (2022).
- [8] Morales-Figueroa, Alejandra, et al. "Optimization of the electrocoagulation process with aluminum electrodes for rainwater treatment." *Frontiers in Environmental Science* 10 (2022): 860011.
- [9] J. T. Phiri, H. Pak, J. We, dan S. Oh, “Evaluation of Pb, Mg, Al, Zn, and Cu as electrode materials in the electrocoagulation of microalgae,” *Processes*, vol. 9, no. 10, Okt 2021, doi: 10.3390/pr9101769.
- [10] J. N. Hakizimana, B. Gourich, M. Chafi, C. Vial, P. Drogui, dan J. Naja, “Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches,” *Desalination* 404, hlm. 1–21.
- [11] Vasudevan S, Lakshmi J, dan Sozhan G., “Electrocoagulation studies on the removal of copper from water using mild steel electrode.,” *Water Environ Res*, vol. 84, no. 1, hlm. 209–19, 2012.
- [12] F. Yang dkk., “Understanding H₂ Evolution Electrochemistry to Minimize Solvated Water Impact on Zinc-Anode Performance,” *Advanced Materials*, vol. 34, no. 45, Nov 2022, doi: 10.1002/adma.202206754.
- [13] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. R. Parga, dan D. L. Cocks, “Electrocoagulation (EC)- Science and applications,” *J Hazard Mater*, vol. 84, no. 1, hlm. 29–41, Jun 2001, doi: 10.1016/S0304-3894(01)00176-5.
- [14] G. Chen, “Electrochemical technologies in wastewater treatment,” *Sep Purif Technol*, vol. 38, no. 1, hlm. 11–41, 2004.
- [15] H. Effendi, *Telaah Kualitas Air: Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Yogyakarta: Kanisius, 2003.