

Penurunan Polutan Limbah Cair Industri Kelapa Sawit Menggunakan Metode Elektrokoagulasi Dengan Pengaruh Laju Alir

Elsa Windiastuti^{1*}, Martasari Beti Pangestuti¹, Edwin Rizki Safitra²,
Suprihatin Suprihatin³, Muhammad Syukur Sarfat³, Mutiara Subiyanto⁴,
Ikhwan Abdul Hakim⁴, Tito Iglesias Sibuea⁴

¹ Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Institut Teknologi Sumatera, Jatiagung, Lampung Selatan, 35365, Indonesia

² Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Jatiagung, Lampung Selatan, 35365, Indonesia

³ Departemen Teknologi Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Dramaga, Bogor, 16680, Indonesia

⁴ Mahasiswa Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Institut Teknologi Sumatera, Jatiagung, Lampung Selatan, 35365, Indonesia

*Alamat email penulis koresponden elsa.windiastuti@tip.itra.ac.id

Abstrak

Limbah cair kelapa sawit merupakan salah satu limbah yang sulit ditangani secara biologis, sehingga metode pengolahan ini membutuhkan waktu yang lama dan lahan yang luas. Metode elektrokoagulasi merupakan salah satu metode alternatif, yang efektif untuk mengolah limbah cair ini. Tujuan penelitian ini adalah menguji kinerja proses elektrokoagulasi untuk menurunkan beban pencemaran pada efluen sekunder pabrik minyak sawit (POMSE). Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan sistem kontinyu menggunakan katoda dengan sistem multi heliks. Elektroda yang digunakan untuk penelitian ini adalah besi ST 40 30mm, disusun secara bipolar. Variasi laju alir sebesar 0,1 hingga 0,8 GPM. Sebelum dilakukan elektrokoagulasi, POMSE dianalisis nilai COD, TSS, TDS dan pH dengan nilai masing-masing sebesar 650 mg/L, 655 mg/L, 1866 ppm, dan pH 6,9. Proses elektrokoagulasi dengan laju alir 0,5 GPM mampu menurunkan kadar COD sebesar 78,15%, TSS sebesar 59,54%, TDS sebesar 47,21% dan meningkatkan pH menjadi 7,7.

Kata kunci: elektroda besi, elektrokoagulasi, POMSE, system multi heliks

1. PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor penting bagi perekonomian Indonesia, namun juga berpotensi mencemari lingkungan karena limbah yang dihasilkan (Windiastuti et al., 2024). Limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) mengandung bahan organik tinggi, minyak, lemak, serta senyawa kimia lain yang jika tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran air, merusak ekosistem dan membahayakan kesehatan manusia (Wiyanto et al., 2014). Limbah cair kelapa sawit, khususnya dari efluen sekunder pabrik minyak sawit (*Palm Oil Mill Secondary Effluent*/POMSE), merupakan salah satu limbah industri yang memiliki karakteristik pencemar organik tinggi, seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Total Suspended Solids* (TSS). Pengolahan limbah ini secara biologis seperti dengan metode lagoon atau kolam stabilisasi membutuhkan waktu yang relatif lama dan memerlukan lahan yang sangat luas, sehingga menjadi tantangan tersendiri dalam hal efisiensi dan keberlanjutan industri kelapa sawit (Hasanudin, 2018; Shintawati et al., 2017). Selain itu, metode biologis juga kurang efektif dalam menghilangkan senyawa-senyawa *recalcitrant* (sulit terdegradasi), yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika dibuang langsung ke badan air.

Berbagai metode pengolahan limbah cair telah diterapkan, mulai dari proses biologis, kimia, hingga fisik. Salah satu teknologi yang mulai banyak diteliti adalah elektrokoagulasi, yang terbukti menurunkan kadar polutan seperti COD, TSS dan minyak lemak dalam limbah cair kelapa sawit

(Hasanudin, 2018; Hasanudin & Haryanto, 2018). Metode elektrokoagulasi mulai banyak diteliti sebagai teknologi alternatif yang menjanjikan untuk pengolahan limbah cair industri, termasuk limbah kelapa sawit. Elektrokoagulasi adalah proses yang memanfaatkan arus listrik untuk melarutkan logam elektroda (biasanya aluminium atau besi) ke dalam larutan, membentuk flokulan yang dapat mengadsorpsi dan mengendapkan zat pencemar. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya mengurangi berbagai jenis pencemar secara simultan, baik organik maupun anorganik, tanpa membutuhkan bahan kimia tambahan dalam jumlah besar (Naje & Abbas, 2013; Saad et al., 2021). Dengan sistem operasi yang relatif sederhana dan waktu proses yang lebih cepat dibandingkan metode konvensional, elektrokoagulasi dinilai lebih efisien dan ramah lingkungan. Namun, implementasi teknologi ini di industri masih menghadapi tantangan dalam optimasi parameter operasional, salah satunya adalah laju alir limbah cair yang diproses.

Riset mengenai pengaruh laju alir pada proses elektrokoagulasi untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit masih tergolong terbatas. Sailah et al. (2020) dan Windiastuti et al. (2024), telah melakukan elektrokoagulasi LCPKS secara *batch* dengan variasi waktu dan tegangan. Sebagian besar penelitian lebih fokus pada variasi tegangan, jenis elektroda atau waktu operasi, sementara pengaruh laju alir terhadap efisiensi penurunan polutan belum dikaji secara mendalam. Padahal, laju alir sangat menentukan waktu kontak antara limbah dengan elektroda, yang pada akhirnya mempengaruhi efektivitas penerapan elektrokoagulasi pada limbah cair.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja proses elektrokoagulasi secara kontinyu dalam menurunkan beban pencemaran pada efluen sekunder pabrik minyak sawit. Penggunaan sistem kontinyu bertujuan untuk meniru kondisi proses aktual di lapangan, sehingga hasil penelitian diharapkan dapat diaplikasikan secara langsung dalam skala industri. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menganalisis parameter kualitas air seperti COD, TSS, TDS dan pH sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi.

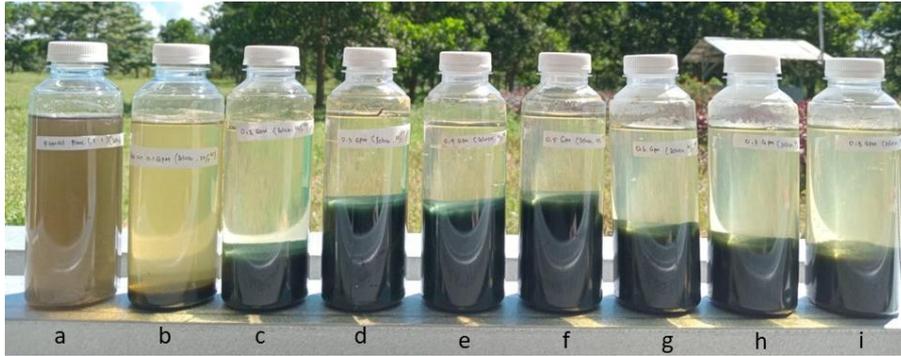
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan limbah cair industri kelapa sawit yang telah ditangani secara biologis berupa *Palm Oil Mill Secondary Effluent (POMSE)* dari *effluent* kolam anaerobik. Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan sistem kontinyu menggunakan katoda dengan sistem multi heliks. Elektroda yang digunakan merupakan Fe 30 mm dengan tegangan 20 Ampere. Sebanyak 20 L limbah cair yang telah diencerkan dengan perbandingan 1:1 dimasukkan ke dalam reaktor elektrokoagulasi. Selanjutnya dialirkan arus listrik ke batang elektroda. Laju alir yang digunakan yaitu 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 dalam satuan gallon per menit (GPM).

Prosedur pengolahan data yang dilakukan ialah membandingkan data karakteristik awal limbah anaerobik kelapa sawit dengan data setelah diberi perlakuan elektrokoagulasi. Parameter yang dibandingkan yaitu COD, TSS, TDS dan pH. Parameter hasil elektrokoagulasi juga dibandingkan dengan baku mutu limbah cair kelapa sawit yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses elektrokoagulasi merupakan proses penghantaran arus listrik dialirkan melalui elektroda yang terendam dalam limbah cair, sehingga terjadi reaksi elektrokimia yang menghasilkan ion-ion koagulan secara *in situ*. Ion-ion ini kemudian berinteraksi dengan polutan organik dalam limbah, membentuk flok yang mudah dipisahkan dari air (Villalobos-Lara et al., 2021; Windiastuti et al., 2024). Gambar 1 menunjukkan perubahan visual POMSE sebelum dan setelah dilakukan elektrokoagulasi.

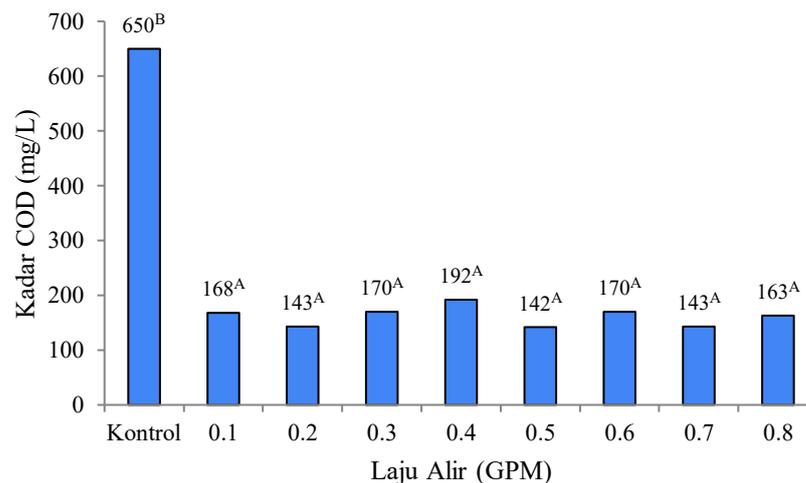


Gambar 1 Perubahan visual POMSE sebelum dan setelah dilakukan elektrokoagulasi.

Keterangan: tanpa elektrokoagulasi (a); 0,1 GPM (b); 0,2 GPM (c); 0,3 GPM (d); 0,4 GPM (e); 0,5 GPM (f); 0,6 GPM (g); 0,7 GPM (h); 0,8 GPM (i).

3.1 Pengaruh Elektrokoagulasi terhadap penurunan COD

Penurunan konsentrasi COD menunjukkan penurunan senyawa organik dalam air limbah, karena pada dasarnya tujuan pengukuran COD adalah untuk melihat jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam air (Hanum et al., 2015). Pada penelitian ini kadar COD sebelum dilakukan elektrokoagulasi sebesar 575 mg/L. Proses elektrokoagulasi mampu menurunkan kadar COD sebesar 70 - 78%. Proses elektrokoagulasi dengan laju alir 0,5 GPM mampu menurunkan kadar COD sebesar 78,15% dengan nilai COD sebesar 142 mg/L. Berdasarkan hasil uji ANOVA, laju alir tidak berpengaruh signifikan terhadap penurunan COD LCPKS. Gambar 2 menyajikan diagram pengaruh proses elektrokoagulasi pada penurunan nilai COD POMSE. Proses Elektrokoagulasi LCPKS menggunakan sistem batch yang dilakukan oleh Windiastuti et al. (2024), dapat menurunkan kadar COD sebesar 50%.



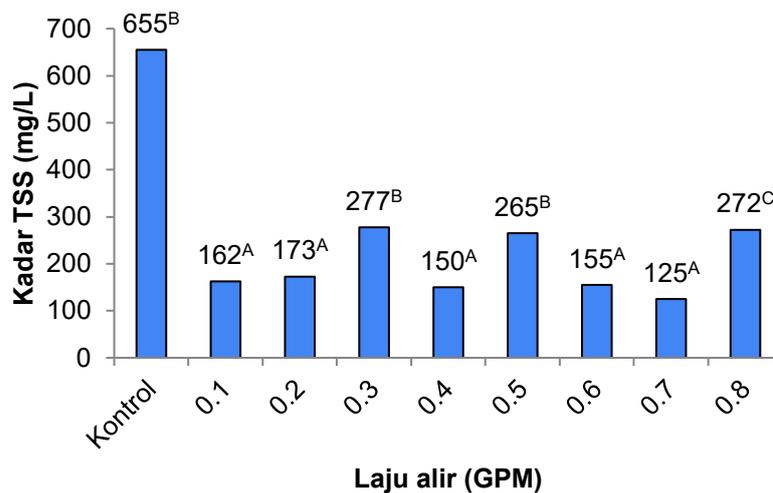
Gambar 2 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap penurunan nilai COD.

Efektivitas elektrokoagulasi dalam menurunkan COD pada pengolahan POMSE telah dilakukan dalam berbagai studi terdahulu. Proses Elektrokoagulasi LCPKS menggunakan sistem batch yang dilakukan oleh Windiastuti et al. (2024), dapat menurunkan kadar COD sebesar 50%. Tyagi et al. (2014), melaporkan bahwa elektrokoagulasi dengan elektroda besi dapat menurunkan COD hingga 76%. Secara umum, elektrokoagulasi merupakan metode yang efektif, ramah lingkungan dan mudah dioperasikan untuk pengolahan POMSE, dengan penurunan COD yang kompetitif dibandingkan metode konvensional.

3.2 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap penurunan TSS

TSS (*Total Suspended Solids*) adalah zat yang mengandung komponen organik dan anorganik yang tidak terlarut dalam air dengan ukuran maksimum 2 μ m. Kehilangan nilai TSS dalam proses elektrokoagulasi disebabkan oleh perubahan masa flok yang saling mengikat sehingga flok memiliki masa yang lebih besar dan mengakibatkan terjadinya pengendapan (Windiastruti et al., 2024).

Penurunan nilai TSS tertinggi yaitu sebesar 80,91% pada laju alir 0,7 GPM. Baku mutu air limbah untuk parameter TSS adalah 300 mg/L, hasil yang didapat dari proses elektrokoagulasi sistem kontinu berkisar antara 125-277 mg/L. Hasil tersebut telah memenuhi baku mutu air limbah. Berdasarkan hasil perhitungan Anova, laju alir berpengaruh tidak signifikan terhadap penurunan TSS. Gambar 3 menyajikan diagram pengaruh proses elektrokoagulasi pada penurunan nilai TSS.

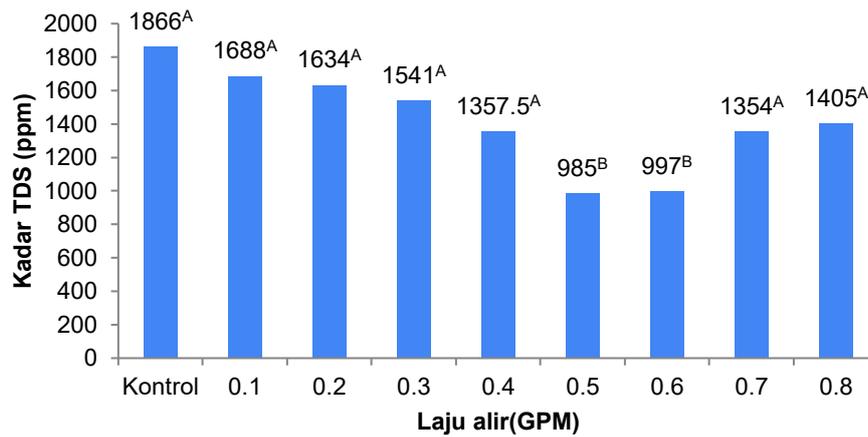


Gambar 3 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap penurunan nilai TSS.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu menurunkan TSS secara signifikan pada POMSE. Fauzi et al. (2019), melaporkan kombinasi elektroda Al-Fe dapat mereduksi TSS hingga 76%. Proses elektrokoagulasi menghasilkan senyawa $Fe(OH)_3$ yang berfungsi sebagai koagulan untuk mengadsorpsi partikel tersuspensi dan koloid dalam air limbah, sehingga terjadi pengendapan yang efektif mengurangi TSS.

3.3 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap penurunan TDS

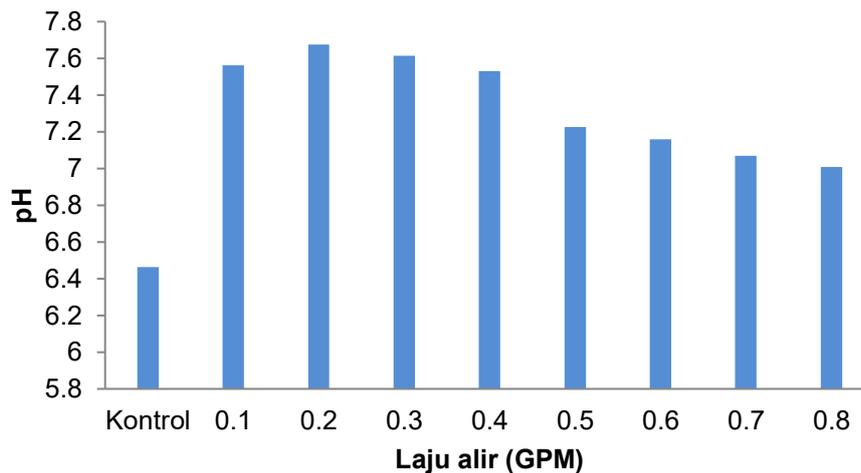
Nilai TDS menjadi penanda adanya kandungan padatan terlarut dalam air yang terdiri dari senyawa organik dan senyawa anorganik. Gambar 4 menunjukkan penurunan TDS pada LCPKS. Penurunan nilai TDS terbesar didapatkan pada laju alir 0,5 GPM yaitu sebesar 47,2%. Berdasarkan hasil Anova, laju alir tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan nilai TDS. Laju alir yang optimal dapat meningkatkan kontak antara ion koagulan yang terbentuk di permukaan elektroda dengan partikel terlarut dalam air limbah, sehingga proses koagulasi dan flokulasi berjalan lebih efektif. Laju alir yang terlalu rendah menandakan bahwa waktu tinggal limbah di dalam reaktor elektrokoagulasi akan lebih lama, namun distribusi ion koagulan menjadi kurang merata dan dapat menyebabkan penurunan efisiensi proses. Sebaliknya, jika laju alir yang digunakan terlalu tinggi, maka waktu kontak antara ion koagulan dan zat terlarut menjadi sangat singkat. Sehingga pembentukan flok tidak optimal dan penghilangan TDS pada air limbah menjadi kurang maksimal.



Gambar 4 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap penurunan nilai TDS.

3.4 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap kenaikan pH

Hasil analisis menunjukkan bahwa selama proses elektrokoagulasi terjadi perubahan pH. Perubahan pH semakin meningkat seiring dengan penambahan waktu elektrokoagulasi. pH yang dihasilkan cenderung basa yaitu berkisar antara 7,2 hingga 7,8. Peningkatan pH tersebut memenuhi baku mutu air limbah kelapa sawit yaitu sebesar 6,0-9,0. Kenaikan pH disebabkan oleh reaksi elektrokimia pada elektroda yang menghasilkan ion hidroksida (OH^-) sehingga meningkatkan alkalinitas larutan selama proses berlangsung. Elektrokoagulasi menggunakan besi (Fe) sebagai elektroda menghasilkan reaksi redoks di anoda dan katoda. Reaksi pada anoda adalah oksidasi besi (Fe) menjadi ion Fe(III) , sedangkan reaksi di katoda adalah reduksi air menjadi hidrogen dan ion hidroksida.



Gambar 5 Pengaruh elektrokoagulasi terhadap peningkatan pH.

4. KESIMPULAN

Proses elektrokoagulasi terbukti efektif dalam mereduksi polutan pada POMSE, seperti COD, TSS dan TDS. Penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi dapat menurunkan COD sebesar 78,15% pada laju alir 0,5 GPM, dengan nilai akhir COD sebesar 142 mg/L, meskipun laju alir tidak berpengaruh signifikan terhadap penurunan COD. Penurunan TSS mencapai 80,91% pada laju alir 0,7 GPM. Penurunan TDS terbesar didapatkan pada laju alir 0,5 GPM sebesar 47,2%. Selain itu,

proses elektrokoagulasi menyebabkan peningkatan pH cenderung netral. Seluruh parameter yang diujikan telah memenuhi baku mutu air limbah yang telah ditentukan.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dari Kementerian Keuangan Republik Indonesia yang telah memberikan pendanaan dan mendukung penelitian ini melalui Skema Pendanaan Riset Pembangunan Berkelanjutan (PRPB) Skema Inklusivitas Batch III tahun anggaran 2024. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Agroinvestama Group dan PT. Perkebunan Nusantara IV Regional 7 yang telah memberikan sampel penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Fauzi, N., udyani, kartika, Zuchrillah, D. R., & Hasanah, F. (2019). Penggunaan Metode Elektrokoagulasi Menggunakan ElektrodaAlumunium dan Besi pada Pengolahan Air Limbah Batik. *Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri 2019*, 100, 2013–2018.
- Hanum, F., Rondang Tambun, M. Yusuf Ritonga, & William Wardhana Kasim. (2015). Electrocoagulation application in palm oil mill effluent treatment (in Indonesian). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(4), 13–17. <https://doi.org/10.32734/jtk.v4i4.1508>
- Hasanudin, U. (2018). *Palm oil mill effluent recycling system forsustainable palm oil industries*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:209465002>
- Hasanudin, U., & Haryanto, A. (2018). Palm oil mill effluent recycling system for sustainable palm oil industries. *Asian Journal of Environmental Biotechnology*, 2(1).
- Naje, A. S., & Abbas, S. A. (2013). Electrocoagulation Technology in Wastewater Treatment: A Review of Methods and Applications. *Civil and Environmental Research*, 3(11), 29–42. <http://www.iiste.org/Journals/index.php/CER/article/view/8115>
- Saad, M. S., Wirzal, M. D. H., & Putra, Z. A. (2021). Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 286, p. 112209). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112209>
- Sailah, I., Reyhanto, F., Puspaningrum, T., Romli, M., Suprihatin, S., & Indrasti, N. S. (2020). Improving the Quality of Anaerobically-Pretreated Palm Oil Mill Effluent Using Electrocoagulation. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 112–124. <https://doi.org/10.12911/22998993/128867>
- Shintawati, Hasanudin, U., & Haryanto, A. (2017). Karakteristik Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Dalam Bioreaktor Cigar Semi Kontinu. *Teknik Pertanian Lampung*, 6(2), 81–88.
- Tyagi, N., Mathur, S., & Kumar, D. (2014). Electrocoagulation process for textile wastewater treatment in continuous upflow reactor. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 73(3), 195–198.
- Villalobos-Lara, A. D., Álvarez, F., Gamiño-Arroyo, Z., Navarro, R., Peralta-Hernández, J. M., Fuentes, R., & Pérez, T. (2021). Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor. *Chemosphere*, 264, 128491. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128491>
- Windiastuti, E., Indrasti, N. S., Hasanudin, U., Bindar, Y., & Suprihatin. (2024). Effect of Electrocoagulation on Improving the Quality of Palm Oil Liquid Waste. *EnvironmentAsia*, 17(3), 174–184. <https://doi.org/10.14456/ea.2024.45>
- Wiyanto, E., Harsono, B., Makmur, A., Pangputra, R., & Stefanus Kurniawan, M. (2014). Penerapan Elektrokoagulasi Dalam Proses Penjernihan Limbah Cair. *JETri*, 12(1), 19–36.