

## PENGARUH UKURAN LEMPENG ALMUNIAM DAN WAKTU KONTAK PADA KARAKTERISTIK LIMBAH CAIR TAHU PASCA ELEKTROKOAGULASI

ADITYA WAHYU NUGRAHA<sup>1\*</sup>, ELSA WINDIASTUTI<sup>1</sup>, ARISTHA APRILYA<sup>1</sup>

1. Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

Email: [aditya.nugraha@tip.itera.ac.id](mailto:aditya.nugraha@tip.itera.ac.id)

### ABSTRAK

*Limbah cair tahu banyak dihasilkan selama produksi tahu mulai dari pembersihan kedelai, hingga pencetakan. Limbah cair tersebut mengandung polutan yang berbahaya bagi lingkungan jika dibuang secara langsung ke badan air tanpa pengolahan. Untuk menangani permasalahan tersebut, elektrokoagulasi limbah cair tahu merupakan salah satu metode yang dapat digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu kontak (20, 30, 40 menit) dan ukuran plat aluminium (4x8, 5x8, 6x8 cm) terhadap penurunan polutan limbah cair industri tahu. Rancangan yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap. Data yang diperoleh diuji menggunakan anova dan diuji lanjut menggunakan BNJ taraf kepercayaan 95%. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin besar ukuran plat dan lama waktu kontak akan semakin besar penurunan TSS dan TDS limbah cair tahu, selain itu juga meningkatkan pH limbah cair. Berdasarkan hasil analisis, penggunaan ukuran plat 6x8 cm selama 40 menit merupakan perlakuan terbaik yang dapat menurunkan TSS hingga 717 mg/L, TDS 6.957 mg/L, menaikkan pH menjadi 6,7, serta menurunkan COD menjadi 660 mg/L dan kekeruhan 58,10 NTU. Namun belum memenuhi baku mutu air limbah tahu sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan proses koagulasi dalam pemenuhan baku mutu limbah cair tahu.*

**Kata kunci:** aluminium, elektrokoagulasi, industri tahu, limbah cair, waktu kontak

### ABSTRACT

*Tofu wastewaters were generated along tofu production from soybean cleaning until tofu molding stage. The wastewater contained high polutan that are harmful for environment ecosystem if discharged directly into waer bodies without treatment. To address this problem, electrocoagulation to tofu wastewater is one method that can be used. This study aims to analyze the effect of contact time (20, 30, 40 minutes) and aluminum plate size (2x8, 5x8, 6x8 cm) to decrease tofu wastewater pollutants. The experimental design research used was a completely Randomized Desing with three repitation. Datas obtained were analyzed using ANOVA and HSD test at a 95% confidence level. The results showed that larger plate sizes and longer contact times led to greater reductions in TSS and TDS in tofu wastewater, as well as an increase in wastewater pH. Based on the results, the use of a 6x8 cm plate size for 40 minutes was the best treatment which can reduce TSS to 717 mg/L, TDS to 6,957 mg/L, increase pH 6.7, and decreasing COD to 660 mg/L and turbidity to 58.10 NTU. However, these results still did not meet the tofu wastewater quality standards; therefore, further research is needed to optimize the coagulation process to comply with the required wastewater standards.*

**Keywords:** aluminum, contact time, electrocoagulation, tofu industry, wastewater

## 1. PENDAHULUAN

Semakin meningkatnya konsumsi tahu mendorong pesatnya perkembangan industri tahu di Indonesia. Menurut Maulana dan Marsono (2021), di Indonesia terdapat 84.000 industri tahu menengah kebawah yang beroperasi. Data Badan Pusat Statistik (2024), tahun 2022 sampai 2023 menunjukkan peningkatan konsumsi tahu sebesar 2,28%. Peningkatan konsumsi tersebut berdampak pada semakin tingginya produksi tahu dan semakin besarnya limbah yang dihasilkan. Menurut Maulana dan Marsono (2021) umumnya industri tahu dapat menghabiskan kedelai sekitar 2,56 jt ton/tahun, menghasilkan limbah cair 20 juta m<sup>3</sup>/tahun dan limbah padat 1,02 juta ton.

Limbah cair industri tahu memiliki warna kuning muda dan terdapat suspensi berwarna putih (Ratnani, 2011) serta mengandung bahan organik yang tinggi. Berdasarkan beberapa kajian nilai *Chemical Oxygen Demand* limbah cair tahu sekitar 5.000-10.500 mg/L (Alimsyah dan Damayanti, 2013; Oktawan dkk., 2022), dimana beban polutan tersebut melebihi standar baku mutu yang ditentukan. Apabila limbah cair tersebut tidak dilakukan pengolahan dengan baik, hal tersebut dapat memberikan dampak negatif bagi lingkungan perairan dan kesehatan manusia (Adack, 2013; Nostia dkk., 2023; Nugroho dkk., 2019). Kondisi tersebut menegaskan perlunya metode pengolahan limbah cair tahu yang efektif dan efisien.

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam penanganan permasalahan limbah cair tahu adalah elektrokoagulasi. Proses elektrokoagulasi melibatkan prinsip elektrokimia, koagulasi dan juga flokulasi (Wiyanto dkk., 2014). Pada proses elektrokoagulasi akan terjadi destabilisasi partikel-partikel terdispersi dan zat-zat pencemar dalam larutan karena adanya energi listrik ke dalam air. Hal inilah yang akan menghasilkan pembentukan gumpalan atau flok yang mudah dipisahkan (Rachmawati dkk., 2014). Metode elektrokoagulasi memiliki beberapa kelebihan diantaranya yaitu menggunakan peralatan yang sederhana, sehingga mudah untuk dioperasikan, menghasilkan buangan air yang jernih, warna yang tidak mencolok dan tidak berbau (Rachmawati dkk., 2014). Selain itu elektrokoagulasi memiliki keunggulan yaitu waktu pengolahan air limbah yang relatif cepat dan tidak memerlukan bahan kimia lainya (Amri dkk., 2020).

Pada umumnya elektroda yang digunakan untuk elektrokoagulasi adalah aluminium. Aluminium memiliki sifat mudah tereduksi dalam air sehingga mudah membentuk ion Al<sup>+3</sup> yang akan berikatan dengan ion OH<sup>-</sup> sehingga terbentuk flok (Mouedhen dkk., 2008). Menurut Saputra dan Hanum (2016), penggunaan elektroda aluminium dapat menurunkan COD dan TSS sebesar 72,89% dan 96,43%. Selain itu, juga dapat menurunkan polutan lainnya, seperti sulfat (Fikri dkk., 2019). Namun, efektivitas elektrokoagulasi juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti waktu kontak dan ukuran lempeng elektroda dalam menurunkan beban polutan limbah cair. Menurut El Hadi (2020), elektrokoagulasi limbah cair tapioka selama 30 menit dapat menurunkan COD, TDS, dan TSS sebesar 71,55%, 906 mg/L, dan 53,70%. Pada (Yuliyani dan Widayatno, 2020), elektrokoagulasi selama 75 menit dapat menurunkan COD hingga 278.22 mg/L dan TSS 110 mg/L. Sementara itu, hasil penelitian Fikri dkk., (2019), menunjukkan bahwa semakin lama waktu yang digunakan pada elektrokoagulasi, maka penurunan polutan semakin besar, seperti kandungan sulfat pada limbah cair tekstil. Hal tersebut juga ditunjukkan oleh Suyanta dkk., (2022) pada limbah cair industri rumah tangga dan Apriyanti dkk., (2023) pada limbah cair susu kedelai.

Sementara itu, ukuran lempeng elektroda aluminium dapat mempengaruhi efisiensi penurunan polutan pada limbah cair. Semakin besar ukuran lempeng, ion Al<sup>3+</sup> yang terbentuk akan semakin besar dan perannya sebagai koagulan akan semakin besar.

Sementara itu, elektrokoagulasi dengan lempeng ukuran 10 x 7,5 x 0,05 cm menurunkan Fe sebesar 26,47 ppm pada limbah minyak pelumas (Ni'mah dkk., 2017). Menurut Melani dkk (2017), ukuran lempeng elektroda (5 x 8 cm) dapat menurunkan COD sebesar 33,01% dan TSS sebesar 54,45% pada limbah cair kain tenun songket.

Namun demikian, hingga saat ini masih terbatas kajian yang secara spesifik mengkaji bagaimana karakteristik awal limbah cair tahu sebelum pengolahan, sejauh mana variasi waktu kontak elektrokoagulasi dan ukuran lempeng elektroda mempengaruhi penurunan parameter pencemar limbah cair tahu. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengkaji adanya kemungkinan interaksi antara waktu kontak dan ukuran lempeng elektroda aluminium dalam menentukan kinerja optimal proses elektrokoagulasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu kontak dan ukuran lempeng aluminium pada karakteristik limbah cair tahu.

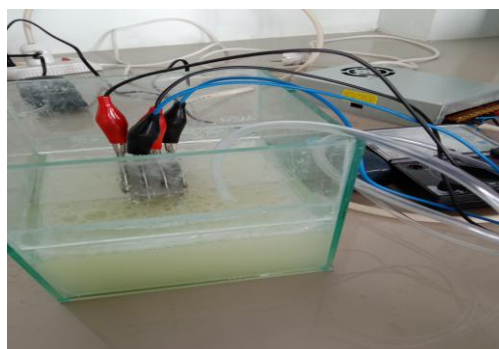
## 2. METODE

### 2.1. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah power supply, voltmeter, bak kaca, kabel penghubung, gelas baker, pH meter, turbidimeter, aerator *aquarium*, spektrofotometer, botol, gelas ukur, erlenmeyer, reaktor COD, vakum filter, desikator, cawan, nampan, stopwatch, aluminium foil, oven, timbangan. Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu air limbah industri tahu pada proses pencetakan, kertas saring, reagent, dan elektroda aluminium.

### 2.2. Prosedur Penelitian

Limbah cair tahu dimasukkan ke dalam bak kaca berukuran 13x13x15 cm (Panjang x lebar x tinggi) sebanyak 1000 ml. Selanjutnya disiapkan rangkaian alat elektrokoagulasi yang tersusun dari *voltmeter* dan *power supply* yang dihubungkan dengan kabel serta batang plat elektroda yang berukuran 4x8, 5x8, 6x8 cm dengan jarak antar elektroda yaitu 1 cm (Gambar 1). Pasangkan alat elektrokoagulasi dan *bubble aquarium* pada bak kaca berisi limbah cair tahu, selanjutnya dialirkan arus listrik sebesar 24 volt dengan waktu kontak 20, 30, dan 40 menit. Setelah dilakukan elektrokoagulasi sampel diendapkan selama 2 hari. Selanjutnya effluent sampel diambil dengan pipet dan dilanjutkan dengan analisis TSS, pH, COD, TDS dan kekeruhan. Sementara itu, perlakuan kontrol dilakukan tanpa elektrokoagulasi dan hanya diendapkan selama 2 hari. Rancangan yang digunakan adalah rancangan acak kelompok (RAK) 2 faktor dengan 3 kali ulangan. Selanjutnya, data yang diperoleh di analisis ragam dan uji lanjut dengan uji beda nyata jujur (BNJ) dengan taraf 5%.



**Gambar 1. Rangkaian alat elektrokoagulasi**

### 2.3. Total Suspended Solid (TSS)

Pengujian TSS dilakukan sesuai dengan standar SNI 06-6989.3-2019 (Badan Standarisasi Nasional, 2019). Diambil sebanyak 25 ml sampel limbah. selanjutnya sampel limbah cair difiltrasi dengan menggunakan pompa vakum, selama 3 menit untuk memastikan filtrasi yang sempurna. Kertas saring yang mengandung residu selanjutnya dipindahkan ke dalam wadah aluminium. Dilakukan pengeringan kertas saring dalam oven sekitar 1 jam dengan suhu 103°C hingga 105°C. Selanjutnya kertas saring didinginkan dalam desikator selama 30 menit dan dilakukan penimbangan hingga diperoleh berat konstan. Nilai TSS dapat dihitung dengan persamaan (1):

$$TSS(mg/L) = \frac{(A-B) \times 1000}{V} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

A = Berat kertas saring + residu kering (mg)

B = Berat kertas saring (mg)

V = Volume uji (mL)

### 2.4. Total Dissolved Solid (TDS)

Pengujian kadar TDS mengacu pada SNI 6989.27:2019. Dilakukan persiapan media penyaring dan cawan porselen yang dipanaskan dengan suhu 180°C ± 2°C selama 1 jam. Selanjutnya cawan didinginkan di dalam desikator selama 30 menit hingga diperoleh berat konstan. Sampel disaring dengan media penyaring hingga benar-benar kering, selanjutnya filtrat dimasukkan ke dalam cawan yang telah disiapkan. Dilakukan pengovenan sekitar 1 jam dengan suhu 180°C ± 2°C. Selanjutnya cawan didinginkan dalam desikator sekitar 30 menit dan dilakukan penimbangan hingga diperoleh berat konstan (Khofifah dan Utami, 2022). Nilai TDS dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2):

$$TDS(mg/L) = \frac{(A-B) \times 1000}{V} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

A = Berat akhir cawan + sampel (mg)

B = Berat awal cawan (mg)

V = Volume uji (mL)

### 2.5. pH

Sebelum digunakan pH meter terlebih dahulu dikalibrasi dengan menggunakan larutan buffer pH 5, 7, dan 9. Setelah dikalibrasi elektroda dimasukkan ke dalam sampel limbah cair. Nilai pH akan muncul pada layar pH meter hingga mencapai tingkat stabil. Sehingga diperoleh nilai pH yang sesuai dengan sampel yang diukur (Ramayanti & Amna, 2019).

### 2.6. Chemical Oxygen Demand (COD)

Larutan standar COD 1000 mgO<sub>2</sub>/L dimasukkan sebanyak 0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 dan 40 mL kedalam tabung volumetric 50 mL. Tambahkan akuades sampai tanda tera dan dihomogenkan. Larutan blanko dan sampel diambil sebanyak 2.5 mL ke dalam tabung reaksi. Sebanyak 1,5 larutan destruksi dan 3,5 mL reagen H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dimasukkan kedalam tabung reaksi, kemudian dihomogenkan. Larutan tersebut dipanaskan pada *heater* disuhu 150 °C dalam waktu 120 menit. Larutan tersebut didinginkan hingga suhu ruang dan diukur pada spektrofotometer UV Vis pada Panjang gelombang 600 nm. Kemudian tentukan persamaan linier yang dihasilkan dengan koefisien korelasi (r) > 0,995. Lakukan hal yang sama pada sampel limbah cair dengan mengganti larutan standar dengan sampel limbah cair (Muhaimin dkk., 2022).

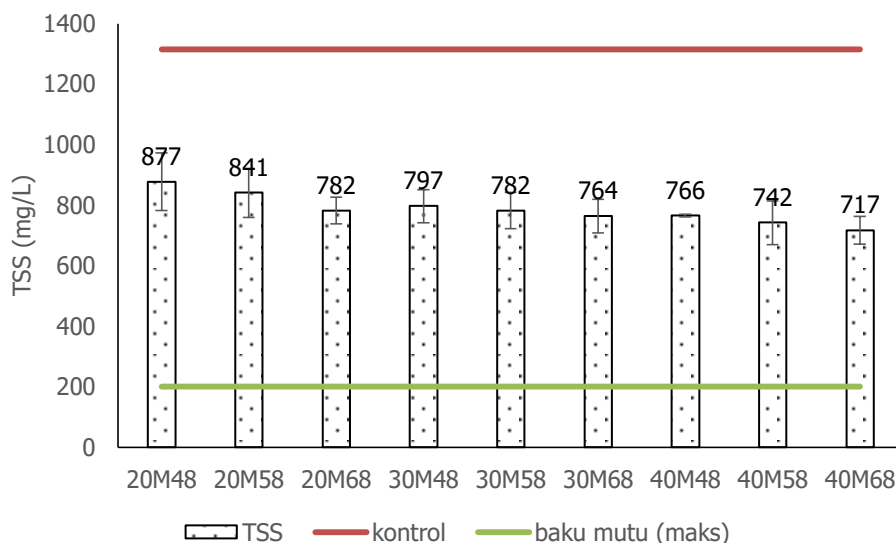
## 2.7. Kekeruhan

Pengujian kekeruhan mengacu pada SNI 06-6989.25.2005 menggunakan alat nefelometer. Nefelometer dikalibrasi sebelum digunakan dalam pengujian. Selanjutnya sampel yang dipersiapkan dihomogenkan terlebih dahulu dan dimasukkan kedalam tabung nefelometer hingga batas yang ditentukan. Lakukan pembacaan nilai kekeruhan pada monitor hingga nilai stabil (Badan Standardisasi Nasional, 2005).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Total Suspended Solid (TSS)

TSS atau total padatan tersuspensi adalah jumlah padatan yang tidak larut dalam air dan dapat tertahan pada saringan dengan ukuran  $2 \mu\text{m}$  (Harahap dkk., 2020). Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa tidak ada interaksi yang signifikan antara waktu kontak dan ukuran lempeng aluminium terhadap kandungan TSS limbah cair ( $P \text{ value} > 0,05$ ) (Gambar 2). Sementara itu, waktu berpengaruh nyata terhadap kandungan TSS limbah cair ( $P \text{ value} 0,025 < 0,05$ ) dan ukuran lempeng tidak berpengaruh nyata ( $P \text{ value} > 0,05$ ). Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kandungan TSS lebih dikontrol oleh lama proses elektrokoagulasi dibandingkan variasi ukuran lempeng aluminium, sehingga waktu kontak menjadi parameter operasi yang lebih kritis dalam desain unit pengolahan limbah cair tahu (Wiyanto dkk., 2014; Saputra dan Hanum, 2016). Dengan kata lain, penambahan waktu kontak dari 20 menjadi 40 menit memberikan kontribusi yang lebih jelas terhadap penurunan TSS dibandingkan dengan hanya memperbesar luas lempeng pada waktu kontak yang sama (Putri dan Purnama, 2022; Melani dkk., 2017).



**Gambar 2. Kandungan TSS limbah cair tahu setelah elektrokoagulasi (20M48: 20 menit, 4x8 cm; 20M58: 20 menit, 5x8 cm; 20M68: 20 menit, 6x8 cm; 30M48: 30 menit, 4x8 cm; 30M58: 30 menit, 5x8 cm; 30M68: 30 menit, 6x8 cm; 40M48: 40 menit, 4x8 cm; 40M58: 40 menit, 5x8 cm; 40M68: 40 menit, 6x8 cm)**

Gambar 2 menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang nyata interaksi antara waktu kontak dan ukuran aluminium, namun data pada Gambar 2 menunjukkan semakin lama waktu kontak dan besar ukuran lempeng aluminium yang digunakan, maka kandungan TSS semakin menurun (Putri dan Purnama, 2022; Melani dkk., 2017). Kandungan TSS pada

limbah cair tahu pada umumnya berkisar antara 1.301–2.924,3 mg/L (Ahmad dan Adiningsih, 2019; Fachrurozi dkk., 2010; Setiawan dkk., 2021). Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan TSS terendah terdapat pada perlakuan 40 menit dengan ukuran lempeng  $6 \times 8$  cm, yakni sebesar  $717 \pm 46,36$  mg/L, sedangkan kombinasi perlakuan yang lain juga lebih rendah jika dibandingkan dengan perlakuan kontrol ( $1.314 \pm 57,87$  mg/L). Meskipun semua perlakuan lebih baik dibandingkan dengan kontrol, namun limbah cair tersebut belum memenuhi baku mutu yang sudah ditetapkan. Berdasarkan Permen KLHK No. 5 Tahun 2014, baku mutu air limbah industri tahu untuk TSS adalah 200 mg/L (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014). Nilai TSS yang masih di atas baku mutu menunjukkan bahwa kandungan padatan tersuspensi dalam limbah cair tahu relatif tinggi dan sulit dihilangkan hanya dengan satu tahap elektrokoagulasi, yang berkaitan dengan keberadaan campuran padatan koloid, sisa protein, lemak, dan karbohidrat terdispersi halus dalam limbah cair tahu (Faisal dkk., 2014; Ratnani, 2011; Nostia dkk., 2023).

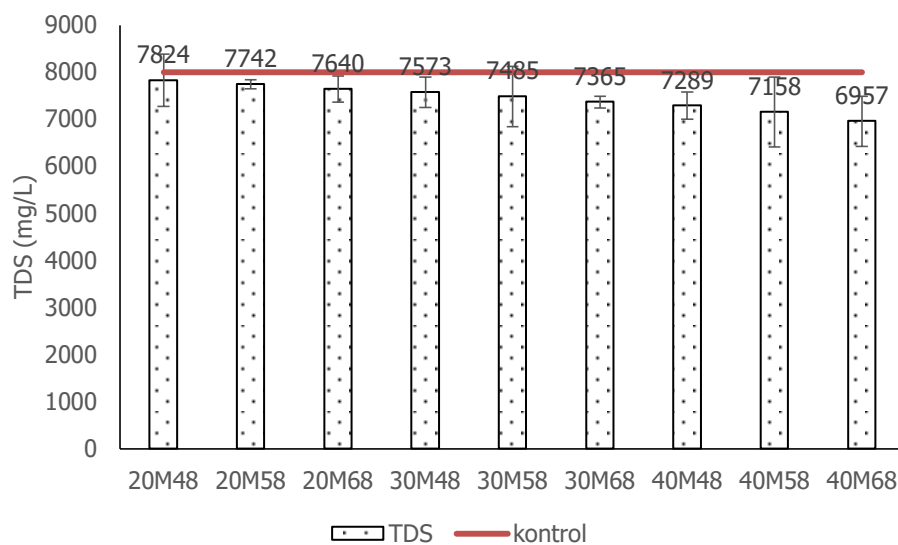
Penurunan TSS dapat terjadi dikarenakan pada proses elektrokoagulasi terjadi pertumbuhan massa flok yang terbentuk, sehingga berat jenis flok bertambah dan membesar sehingga terjadi pengendapan (Wardhani dkk., 2012). Pada proses elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium, ion  $Al^{3+}$  yang terbentuk akan terhidrolisis menghasilkan spesies Al-hidroksida yang berperan sebagai koagulan yang menetralkan muatan partikel dan membentuk sweep flocc berukuran lebih besar (Mouedhen dkk., 2008; Hernaningsih, 2016). Kombinasi destabilisasi muatan dan pembentukan flok sapan ini menyebabkan partikel tersuspensi yang semula stabil dalam fase koloid menjadi mudah mengendap atau terangkut ke permukaan bersama gelembung gas hidrogen yang terbentuk di katoda (Rachmawati dkk., 2014; Hanum dkk., 2015). Menurut El Hadi (2020), terbentuknya ion  $Al^{3+}$  menyebabkan terjadinya proses destabilisasi partikel pada limbah cair, yang mengurangi gaya tolak-menolak antar partikel dan memicu gaya tarik-menarik sehingga terbentuk flok pada air limbah. Massa jenis flok yang lebih besar dari air menyebabkan terjadinya sedimentasi partikel padatan pada air limbah, sedangkan gas hidrogen yang terbentuk pada katoda dapat mengangkat sebagian partikel ke permukaan (Melani dkk., 2017). Selain itu, adanya aerator juga membantu mengangkat partikel padatan di air limbah ke permukaan melalui pembentukan buih yang membawa partikel tersuspensi (Hernaningsih, 2016; Ketut, 2018).

Berdasarkan hasil tersebut, kombinasi 40M68 (waktu kontak 40 menit dan ukuran lempeng  $6 \times 8$  cm) dapat direkomendasikan sebagai kondisi operasi awal untuk menurunkan TSS limbah cair tahu sebelum dilakukan tahapan pengolahan lanjutan, misalnya filtrasi atau proses biologis (Amri dkk., 2020; Maulana & Marsono, 2021). Optimalisasi lanjutan, seperti penyesuaian rapat arus, konfigurasi susunan elektroda, atau penambahan tahap sedimentasi/filtrasi tersendiri, masih diperlukan agar konsentrasi TSS dapat memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan (Hernaningsih, 2016; Yuliyani & Widayatno, 2020; Oktawan dkk., 2022).

### **3.2. Total Dissolved Solid (TDS)**

Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai TDS pada limbah cair tahu setelah proses elektrokoagulasi (Gambar 3). TDS merupakan fraksi padatan terlarut yang terdiri atas ion anorganik dan molekul organik berukuran koloid maupun terlarut halus dengan ukuran umumnya di bawah  $1 \mu m$  (Fendriani dkk., 2020; Tchobanoglous dkk., 2013; Mollah dkk., 2001). Limbah cair tahu diketahui memiliki kandungan bahan organik terlarut yang tinggi, seperti protein, karbohidrat, lemak, dan senyawa bermuatan lain, sehingga nilai TDS awalnya cenderung besar (Sintawardani dkk., 2022; Hardyanti dkk., 2023).

Berdasarkan Gambar 3, kandungan TDS pada limbah cair tahu mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu kontak dan besarnya ukuran lempeng aluminium yang digunakan. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan antara waktu kontak dan ukuran lempeng aluminium tidak memberikan interaksi yang nyata terhadap kandungan TDS ( $P$  value  $> 0,05$ ), dan faktor ukuran lempeng juga tidak berpengaruh signifikan ( $P$  value  $0,54 > 0,05$ ). Sementara itu, faktor waktu kontak berpengaruh signifikan terhadap kandungan TDS ( $P$  value  $0,04 < 0,05$ ), sejalan dengan penelitian pengolahan limbah cair menggunakan elektrokoagulasi yang melaporkan bahwa perpanjangan waktu proses umumnya meningkatkan efisiensi penurunan TDS, TSS, dan COD (Januardi dkk., 2014; Ortenero & Sy Choi, 2022).



**Gambar 3. Kandungan TDS limbah cair tahu setelah elektrokoagulasi (20M48: 20 menit, 4x8 cm; 20M58: 20 menit, 5x8 cm; 20M68: 20 menit, 6x8 cm; 30M48: 30 menit, 4x8 cm; 30M58: 30 menit, 5x8 cm; 30M68: 30 menit, 6x8 cm; 40M48: 40 menit, 4x8 cm; 40M58: 40 menit, 5x8 cm; 40M68: 40 menit, 6x8 cm)**

Gambar 3 menunjukkan bahwa kandungan TDS terendah diperoleh pada 40M68 (waktu kontak 40 menit dengan ukuran lempeng  $6 \times 8$  cm), yaitu  $6.957 \pm 531,14$  mg/L, yang lebih rendah dibandingkan perlakuan kontrol  $7.994 \pm 417,68$  mg/L. Nilai ini juga lebih rendah daripada kadar TDS limbah cair tahu yang dilaporkan oleh Januardi dkk. (2014), yaitu 8.432 mg/L, serta masih berada pada kisaran TDS limbah tahu yang dilaporkan dalam berbagai studi industri tahu yang menekankan tingginya beban padatan terlarut dan organik pada efluen (Sintawardani dkk., 2022; Hardyanti dkk., 2023). Beberapa penelitian elektrokoagulasi lainnya melaporkan bahwa meskipun TDS dapat diturunkan dengan efisiensi bervariasi (sekitar 15–60% tergantung kondisi operasi), nilai TDS akhir seringkali masih di atas target kualitas efluen sehingga diperlukan tahapan pengolahan lanjutan (Mollah dkk., 2001; Ortenero & Sy Choi, 2022).

Meskipun terjadi penurunan TDS yang nyata, nilai TDS efluen masih tergolong tinggi sehingga berpotensi menimbulkan dampak terhadap lingkungan perairan apabila dibuang tanpa pengolahan tambahan. Tingginya TDS pada limbah cair tahu berkaitan dengan kandungan bahan organik terlarut (protein, karbohidrat, lemak) dan nutrisi (nitrogen, fosfor, kalium) yang tinggi, serta keberadaan ion anorganik yang dilepaskan selama proses pengolahan dan dekomposisi bahan organik (Fendriani dkk., 2020; Sintawardani dkk., 2022;

Hardyanti dkk., 2023). Oleh karena itu, elektrokoagulasi pada kondisi ini dapat diposisikan sebagai tahap pra-pengolahan yang menurunkan beban awal, yang secara praktis sering dikombinasikan dengan proses lain seperti filtrasi, adsorpsi, membran, atau pengolahan biologis untuk memperoleh kualitas efluen yang lebih memenuhi baku mutu dan aman bagi ekosistem perairan (Mollah dkk., 2001; Ortenero & Sy Choi, 2022).

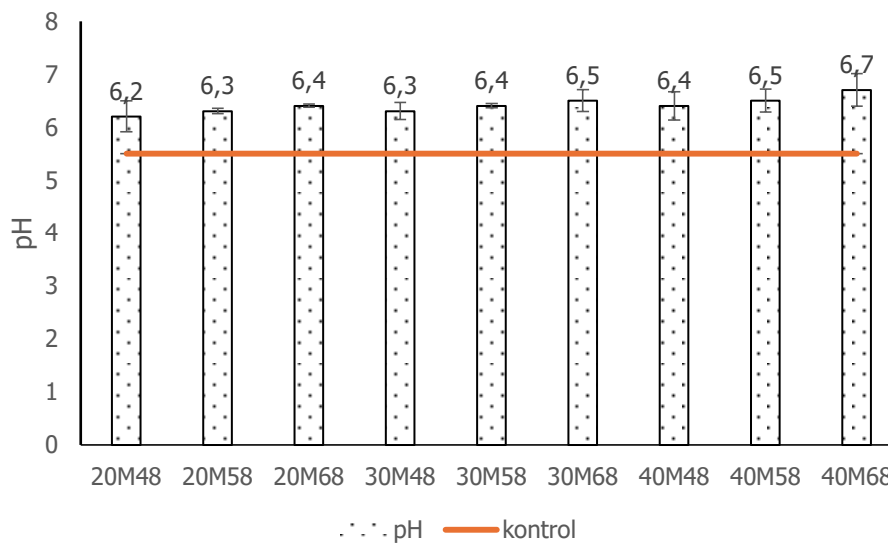
Penurunan kandungan padatan terlarut pada limbah cair tahu terutama disebabkan oleh proses koagulasi–flokulasi dan elektroflotasi selama elektrokoagulasi. Ion  $Al^{3+}$  yang terlepas dari anoda akan terhidrolisis membentuk spesies hidroksida aluminium yang bertindak sebagai koagulan, menetralkan muatan partikel koloid dan mengikat polutan terlarut sehingga terbentuk mikroflok dan makroflok yang kemudian mengendap atau terbawa naik oleh gelembung gas hidrogen dan oksigen dari elektroda (Mollah dkk., 2001; Ortenero dan Sy Choi, 2022). Mekanisme ini konsisten dengan berbagai kajian yang melaporkan bahwa elektrokoagulasi–elektroflotasi efektif menurunkan TDS, TSS, dan parameter organik lain pada berbagai jenis limbah cair karena polutan terperangkap dalam flok hidroksida logam dan dipisahkan dari fase cair (Mollah dkk., 2001; Fendriani dkk., 2020; Ortenero & Sy Choi, 2022).

### **3.3. pH**

Secara umum, pH limbah cair tahu sebelum perlakuan berada pada kondisi asam hingga agak asam (pH 4–5,5) sebagaimana dilaporkan oleh Januardi dkk. (2014) dan Faisal dkk. (2014), serta terlihat pada perlakuan kontrol penelitian ini (pH 5,5). Kondisi ini umumnya disebabkan oleh adanya sisa bahan organik terlarut seperti protein, karbohidrat, dan asam-asam organik yang terbentuk selama proses pengolahan kedelai menjadi tahu (Januardi dkk., 2014; Faisal dkk., 2014). Bahan organik tersebut akan mengalami dekomposisi dan menghasilkan senyawa-senyawa yang menurunkan pH. pH yang terlalu rendah tidak hanya berpotensi menimbulkan korosi pada jaringan perpipaan, tetapi juga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem perairan apabila limbah dibuang langsung ke lingkungan (Hanum dkk., 2015).

Setelah proses elektrokoagulasi, pH limbah cair meningkat menjadi 6,2–6,7 dan telah memenuhi baku mutu pH limbah cair tahu berdasarkan Permen KLHK No. 5 Tahun 2014, yaitu 6–9 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014). Meskipun secara statistik tidak terdapat perbedaan yang nyata antar perlakuan ( $P$  value > 0,05), pola data pada Gambar 4 menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan pH seiring bertambahnya waktu kontak dan ukuran lempeng elektroda yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi tidak hanya berperan dalam penghilangan padatan tersuspensi dan bahan organik, tetapi juga membantu menetralkan pH limbah sehingga lebih aman untuk dibuang ke badan air penerima (Hermida dkk., 2020; Lestari & Agung, 2020).

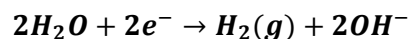
*Pengaruh Ukuran Lempeng Aluminium dan Waktu Kontak pada Karakteristik Limbah Cair Tahu Pasca Elektrokoagulasi*



**Gambar 4. pH limbah cair tahu setelah elektrokoagulasi (20M48: 20 menit, 4x8 cm; 20M58: 20 menit, 5x8 cm; 20M68: 20 menit, 6x8 cm; 30M48: 30 menit, 4x8 cm; 30M58: 30 menit, 5x8 cm; 30M68: 30 menit, 6x8 cm; 40M48: 40 menit, 4x8 cm; 40M58: 40 menit, 5x8 cm; 40M68: 40 menit, 6x8 cm)**

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa tidak ada interaksi yang nyata antara waktu kontak dan ukuran lempeng yang digunakan terhadap nilai pH limbah cair ( $P\ value > 0,05$ ) (Gambar 4). Sementara itu, masing – masing factor juga tidak menunjukkan perbedaan yang nyata, waktu kontak ( $P\ Value\ 0,05 = 0,05$ ) dan ukuran lempeng ( $P\ Value\ 0,542 > 0,05$ ). Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak dan besar ukuran lempeng menyebabkan terjadinya peningkatan pH limbah cair, sehingga pH limbah cair menjadi netral (pH 6,2 – 6,7). Hal tersebut berbeda dengan perlakuan kontrol yang masih bersifat asam. Peningkatan pH tertinggi pada perlakuan 40M68 (40 menit dengan ukuran lempeng 6 x 8 cm). Peningkatan pH pada limbah cair dalam proses elektrokoagulasi disebabkan adanya ion  $OH^-$  yang terbentuk selama proses tersebut. Semakin banyak ion  $OH^-$  yang terbentuk, maka pH limbah cair akan mengalami peningkatan. Ion  $OH^-$  terbentuk karena adanya reaksi hidrolisis pada elektroda. Hal tersebut selaras dengan penelitian Hanum dkk (2015), Hermida dkk (2020) dan Lestari dan Agung (2020).

Secara mekanisme, peningkatan pH pada proses elektrokoagulasi berkaitan dengan reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan elektroda. Pada elektroda logam (misalnya aluminium atau besi), terjadi reaksi oksidasi yang melepaskan ion logam ke dalam larutan, sementara di katoda terjadi reaksi reduksi air yang menghasilkan ion  $OH^-$  (Hanum dkk., 2015; Hermida dkk., 2020). Reaksi reduksi air di katoda dapat digambarkan secara umum sebagai berikut:



Pembentukan ion  $OH^-$  dalam jumlah yang semakin besar akan meningkatkan konsentrasi basa dalam larutan dan mendorong kenaikan pH dari kondisi asam menuju netral. Semakin lama waktu kontak dan semakin luas permukaan elektroda, semakin besar pula peluang terjadinya reaksi ini, sehingga kecenderungan kenaikan pH menjadi lebih jelas, meskipun secara statistik belum berbeda nyata pada taraf uji yang digunakan (Lestari dan Agung, 2020).

Kondisi pH netral yang diperoleh pada penelitian ini sangat menguntungkan, karena pH netral umumnya merupakan rentang optimum bagi proses-proses pengolahan lanjutan, seperti pengolahan biologis aerobik atau anaerobik (Hermida dkk., 2020). pH yang terlalu rendah dapat menghambat aktivitas mikroorganisme pengurai, sedangkan pH yang terlalu tinggi dapat bersifat toksik bagi biota perairan (Hanum dkk., 2015). Dengan demikian, proses elektrokoagulasi tidak hanya berfungsi sebagai proses pemisahan fisik-kimia, tetapi juga sebagai tahap "kondisioning" pH sebelum limbah dibuang atau diolah lebih lanjut. Temuan ini konsisten dengan laporan Hanum dkk. (2015), Hermida dkk. (2020), serta Lestari dan Agung (2020) yang menyatakan bahwa elektrokoagulasi cenderung meningkatkan pH limbah cair menuju kondisi yang lebih netral akibat terbentuknya ion  $\text{OH}^-$ .

Selain itu, perbedaan antara pH kontrol (5,5) dan pH setelah elektrokoagulasi (6,2–6,7) mengindikasikan bahwa tanpa perlakuan, limbah cair tahu berpotensi belum memenuhi baku mutu pH, terutama bila kondisi awal limbah berada di sekitar pH 4–5 sebagaimana dilaporkan di beberapa literatur (Januardi dkk., 2014; Faisal dkk., 2014). Oleh karena itu, penerapan elektrokoagulasi pada limbah cair industri tahu dapat menjadi salah satu alternatif teknologi yang efektif tidak hanya untuk menurunkan beban pencemar, tetapi juga untuk mengatur pH agar sesuai dengan ketentuan regulasi yang berlaku (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014; Hermida dkk., 2020).

#### **3.4. Perlakuan terbaik**

Berdasarkan parameter TSS, TDS, dan pH, masing-masing perlakuan tidak menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik. Dari sisi baku mutu TSS, seluruh perlakuan belum memenuhi standar yang ditetapkan, sehingga secara regulatif belum layak untuk dibuang langsung ke badan air. Namun demikian, dari parameter pH, semua perlakuan telah memenuhi baku mutu limbah cair sesuai ketentuan yang berlaku. Untuk TDS sendiri belum terdapat standar baku mutu spesifik pada limbah cair industri tahu, sehingga parameter ini lebih dimanfaatkan sebagai indikator perubahan kualitas air akibat perlakuan.

Oleh karena itu, penentuan perlakuan terbaik didasarkan pada efektivitas penurunan TSS dan TDS dibandingkan kontrol. Perlakuan 40M68 dengan waktu kontak 40 menit dan ukuran lempeng  $6 \times 8$  cm menunjukkan performa paling baik dalam menurunkan TSS dan TDS limbah cair. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kombinasi luas permukaan elektroda dan waktu kontak tersebut cukup optimal untuk mendukung proses pembentukan flok dan pengendapan partikel tersuspensi. Luas lempeng yang lebih besar berpotensi meningkatkan luas area reaksi sehingga ion koagulan yang terbentuk juga lebih banyak, sedangkan waktu kontak 40 menit memberikan kesempatan yang cukup bagi proses destabilisasi partikel dan pembentukan flok yang lebih besar dan mudah mengendap.

Meskipun belum memenuhi baku mutu TSS, perlakuan terbaik ini tetap penting karena menunjukkan arah perbaikan kualitas limbah cair melalui proses elektrokoagulasi. Kondisi ini dapat dijadikan dasar untuk optimasi lebih lanjut, misalnya melalui penyesuaian kuat arus, jarak antar elektroda, waktu kontak yang lebih lama, atau kombinasi dengan proses pengolahan lain (misalnya sedimentasi lanjutan atau filtrasi) untuk mencapai baku mutu yang dipersyaratkan. Perlakuan terbaik yang telah terpilih kemudian dianalisis lebih lanjut terhadap parameter COD dan kekeruhan sebagai indikator tambahan kualitas limbah cair.

#### **3.5. Chemical Oxygen Demand (COD) dan Kekeruhan**

Berdasarkan hasil uji COD pada Tabel 1, nilai COD pada perlakuan terbaik sebesar 660 mg/L, lebih rendah dibandingkan kontrol yang sebesar 1.298 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi mampu menurunkan beban bahan organik dalam limbah cair tahu.

Meskipun terjadi penurunan yang cukup besar dibandingkan kontrol, nilai COD tersebut masih berada di atas baku mutu air limbah industri tahu yang ditetapkan KLHK (2014), yaitu 300 mg/L. Artinya, secara proses sudah ada indikasi keberhasilan, namun secara regulatif masih diperlukan upaya pengolahan lanjutan.

**Tabel 1. Kandungan COD dan Kekeruhan Limbah Cair Tahu Perlakuan Terbaik dan Kontrol**

<b>Parameter</b>	<b>Perlakuan terbaik</b>	<b>Kontrol</b>	<b>Standar*</b>
COD (mg/L)	660 ± 25,05	1.298 ± 50,29	300
Kekeruhan (NTu)	58,10 ± 1,90	1.097 ± 40,67	-

\*KLHK (2014)

Tingginya nilai COD pada limbah cair tahu setelah perlakuan mengindikasikan bahwa proses elektrokoagulasi belum berlangsung secara optimal untuk menghilangkan fraksi organik terlarut. Elektrokoagulasi umumnya lebih efektif menghilangkan polutan yang berbentuk koloid dan tersuspensi melalui mekanisme destabilisasi partikel dan pembentukan flok. Senyawa organik terlarut dengan ukuran molekul kecil cenderung lebih sulit terkoagulasi sehingga masih tersisa dalam larutan dan tetap berkontribusi terhadap nilai COD. Walaupun terjadi penurunan pada TSS dan TDS limbah cair, penurunan tersebut belum berdampak signifikan terhadap fraksi COD yang berasal dari zat organik terlarut.

Menurut Alawiyah (2007), semakin banyak flok yang terbentuk dan mengendap, maka penurunan COD akan semakin besar karena sebagian bahan organik ikut terjebak atau terperangkap di dalam flok tersebut. Pada penelitian ini, terbentuknya flok sudah tercermin dari penurunan TSS dan kekeruhan, namun kemungkinan masih terdapat keterbatasan pada beberapa faktor proses, seperti kuat arus, waktu kontak, jarak elektroda, maupun kondisi pH optimum untuk pembentukan flok maksimum. Selain itu, karakteristik limbah cair tahu yang kaya protein, lemak, dan karbohidrat juga berpotensi menghasilkan senyawa organik terlarut yang lebih stabil dan sulit terdegradasi secara fisikokimia melalui elektrokoagulasi saja.

Kekeruhan dapat menunjukkan tingginya polutan yang terkandung dalam limbah cair. Semakin keruh suatu limbah cair, maka polutan lain juga semakin tinggi. Menurut (Ketut, 2018) tingginya nilai TSS juga dapat berakibat pada kadar kekeruhan air dan juga sebaliknya. Berdasarkan Tabel 1, nilai kekeruhan pada perlakuan terbaik sebesar 58,10 ± 1,90 NTU, jauh lebih rendah dibandingkan dengan kontrol yang sebesar 1.097 ± 40,67 NTU. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi sangat efektif dalam menurunkan kekeruhan limbah cair tahu. Mekanisme yang terjadi adalah destabilisasi partikel bermuatan oleh ion koagulan yang dihasilkan dari pelarutan elektroda, diikuti dengan proses penggumpalan (flokulasi) dan pengendapan. Semakin banyak partikel tersuspensi yang teraglomerasi membentuk flok berukuran besar, semakin besar pula penurunan kekeruhan yang dapat dicapai. Semakin jernih suatu larutan maka nilai kekeruhan juga semakin menurun (Hernaningsih, 2016).

#### **4. KESIMPULAN**

Secara keseluruhan, semakin besar ukuran lempeng aluminium dan semakin lama waktu kontak, semakin besar penurunan TSS dan TDS yang dicapai, sekaligus diikuti peningkatan pH yang menuju pH netral. Penggunaan ukuran plat 6x8 cm selama 40 menit merupakan perlakuan terbaik yang dapat menurunkan TSS hingga 717 mg/L, TDS 6.957 mg/L, menaikkan pH menjadi 6,7, serta menurunkan COD menjadi 660 mg/L dan kekeruhan 58,10

NTU. Namun perlakuan tersebut belum memenuhi baku mutu air limbah tahu sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan proses koagulasi dalam pemenuhan baku mutu limbah cair tahu. Perlakuan terbaik pada penelitian ini dapat menjadi tahap pretreatment pengolahan limbah cair tahu di industri.

## PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera atas fasilitas yang diberikan dalam penelitian ini dan Industri Tahu X di Bandar Lampung atas bahan baku yang diberikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adack, J. (2013). Dampak pencemaran limbah pabrik tahu terhadap lingkungan hidup. *Lex Administratum*, 1(3), 78–87.
- Ahmad, H., & Adiningsih, R. (2019). Efektivitas metode fitoremediasi menggunakan tanaman enceng gondok dan kangkung air dalam menurunkan kadar BOD dan TSS pada limbah cair industri tahu. *Jurnal Farmasetis*, 8(2), 31–38.
- Alawiyah, T. (2007). Penurunan kadar chemical oxygen demand (COD) pada lindi (Leachate) TPA Piyungan dengan metode elektrokoagulasi. Universitas Islam Indonesia.
- Alimsyah, A., & Damayanti, A. (2013). Penggunaan arang tempurung kelapa dan enceng gondok untuk pengolahan air limbah tahu dengan variasi konsentrasi. *Jurnal Teknik Pomits*, 2(1), 6–9.
- Amri, I., Destinefa, P., & Zultiniar, Z. (2020). Pengolahan limbah cair tahu menjadi air bersih dengan metode elektrokoagulasi secara kontinyu. *Chempublish Journal*, 5(1), 57–67.
- Apriyanti, M., Sutanto, & Kusumawardan, L. J. (2023). Application of electrocoagulation in soymilk wastewater treatment process with varion of time and voltage. *Helium: Journal of Science and Applied Chemistry*, 3(2), 45–53.
- Badan Pusat Statistik. (2024). Rata-rata Konsumsi Perkapita Seminggu Menurut Kelompok Kacang-Kacangan Per Kabupaten/kota (Satuan Komoditas), 2021-2023. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/mjEwMSMy/Rata-Rata-Konsumsi-Perkapita-Seminggu-Menurut-Kelompok-Kacang-Kacangan-per-Kabupaten-Kota.html>.
- Badan Standarisasi Nasional. (2005). SNI 06-6989.25-2005. Air dan air limbah – Bagian 25 : Cara uji kekeruhan dengan nefelometer. BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). SNI 06-6989.3. 2019 Air dan air limbah- Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (Total Suspended Solid, TSS) secara gravimetri. BSN.
- El Hadi, M. (2020). Elektrokoagulasi limbah cair tepung mocaf modified cassava flour dengan panel surya sebagai sumber energi. UIN Syarif Hidayatullah. Jakarta
- Fachrurrozi, M., Utami, L. B., & Suryani, D. (2010). Pengaruh variasi biomassa Pistia stratiotes L. terhadap penurunan kadar BOD, COD, dan TSS limbah cair tahu di dusun klero sleman yogyakarta. *Kes Mas*, 4(1), 1–16.
- Faisal, M., Mulana, F., Alam, P. N., & Daimon, H. (2014). Wastewater characteristics from tofu processing facilities in banda aceh. *The Proceedings of The 4th Annual International Conference Syiah Kuala University (AIC Unsyiah)*, 18–21.
- Fendriani, Y., Handayani, L., & Peslinof, M. (2020). Pengaruh variasi jarak elektroda dan waktu terhadap pH dan TDS limbah cair batik menggunakan metode elektrokoagulasi. *Journal Online of Physic*, 5(2), 59–64. <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.22437/jop.v5i2.9869>

- Fikri, E., Muktie, K. L., & Pujiono. (2019). Difference of electrocoagulation contact time on sulfide decrease and color in waste water in sipatex putri lestari company, Bandung, West Java, Indonesia. *Journal of Industrial Pollution Control*, 35(1), 2244–2250.
- Hanum, F., Tambun, R., & Yusuf, M. R. (2015). Electrocoagulation application in the processing of palm oil mill effluent from anaerobic fixed bed reactor. *Proceedings of The 5th Annual International Conference Syiah Kuala University (AIC Unsyiah) 2015*, 125–129.
- Harahap, M. R., Amanda, L. D., & Matondang, A. H. (2020). Analisis Kadar Cod (Chemical Oxygen Demand) Dan Tss (Total Suspended Solid) Pada Limbah Cair Dengan Menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis. *Amina: Ar-Raniry Chemistry Journal*, 2(2), 79–83.
- Hardyanti, N., Susanto, H., Budihardjo, M. A., Purwono, & Saputra, A. T. (2023). Characteristics of Tofu Wastewater From Different Soybeans and Wastewater at Each Stage of Tofu Production. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(8), 54–63. <https://doi.org/10.12912/27197050/171493>
- Hermida, L., Kustiani, I., & Suharno. (2020). Evaluasi kinerja sistem elektrokoagulasi batch recycle dengan susunan elektroda monopolar dalam mengolah limbah cair tapioka. *Jurnal Profesi Insinyur*, 1(1), 1–14.
- Hernaningsih, T. (2016). Tinjauan teknologi pengolahan teknologi pengolahan air limbah industri dengan proses elektrokoagulasi. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 9(1), 31–46.
- Januardi, R., Setyawati, T. R., & Mukarlina. (2014). Pengolahan limbah cair tahu menggunakan kombinasi serbuk kelor (*Moringa oleifera*) dan asam jawa (*Tamarindus indica*). *Jurnal Protobiont*, 3(1), 41–45. [https://doi.org/DOI: http://dx.doi.org/10.26418/protobiont.v3i1.4580](https://doi.org/DOI:http://dx.doi.org/10.26418/protobiont.v3i1.4580)
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2014). Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup RI No. 5 tahun 2014: Tentang baku mutu air limbah. KLHK. Jakarta
- Ketut, I. (2018). Sistem teknologi pengolahan limbah. Warmadewa University Press.
- Khofifah, & Utami, M. (2022). Analisis kadar total dissolved solid (TDS) dan total suspended solid (TSS) pada limbah cair dari industri gula tebu. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 7(1), 43–49.
- Lestari, N. D., & Agung, T. (2020). Penurunan TSS, TDS dan warna limbah industri batik secara elektrokoagulasi. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 6(1), 37–44.
- Maulana, M. R., & Marsono, B. D. (2021). Penerapan teknologi membran untuk mengolah limbah cair industri tahu (Studi Kasus: UKM Sari Bumi). *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 54–60.
- Melani, A., Lesmana, A. I., & Rifdah, R. (2017). Kajian pengaruh waktu dan ukuran lempengan terhadap limbah cair industri kain tenun songket dengan metode elektrokoagulasi. *Jurnal Distilasi*, 2(1), 23–24.
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC): Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, D., & Ayedi, H. F. (2008). Behavior of aluminium electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 124–135.
- Muhaimin, Prayoga, R. A., & Eniati, E. (2022). Determination of chemical oxygen demand (COD) concentration in domestic wastewater using UV-Vis spectrophotometry method based on the effect of reflux time and preservation time. *Stannum Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*, 4(1), 13–18.
- Ni'mah, L., Fyanidah, F., & Maulana, M. D. (2017). Pengolahan limbah minyak pelumas dengan menggunakan metode elektrokoagulasi. *Chemica: Jurnal Teknik Kimia*, 4(1), 21–26.

- Nostia, R., Kurniawan, A., & Koderi. (2023). Analysis of solid and liquid waste characteristics of tofu industry in Bancar village, Bungkal district, Ponorogo Regency. *Jurnal Pembangunan Dan Alam Lestari*, 14(1), 1–5.
- Nugroho, G. S. F., Sulistyningrum, R., Melania, R. P., & Handayani, W. (2019). Environmental analysis of tofu production in the context of cleaner production: case study of tofu household industries in Salatiga, Indonesia. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 2(2), 127–138.
- Oktiawan, W., Samadikun, B. P., Ashari, A. F., & Purwono. (2022). The efficiency of reducing COD and turbidity of tofu wastewater using a combination of electrocoagulation and Ozone. *IOP Conferences Series: Earth and Environmental Science*.
- Ortenero, J. R., & Sy Choi, A. E. (2022). Electrocoagulation treatment of wastewater: a pareto frontier identification based on the total dissolved solids and cost. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 781–786.
- Putri, R. A., & Purnama, H. (2022). Pengaruh tegangan dan waktu pada pengolahan lindi metode elektrokoagulasi-adsorpsi zeolit. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(2), 1–10.
- Rachmawati, B., Surya, Y. P., & Nirwan, M. (2014). Proses elektrokoagulasi pengolahan limbah laundry. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 6(1), 15–22.
- Ramayanti, D., & Amna, U. (2019). Analisis parameter COD dan pH limbah cair di PT. Pupuk Iskandar Muda (PT. PIM) Lhokseumawe. *Quimica: Jurnal Kimia Sains Dan Terapan*, 1(1), 1–6.
- Ratnani, R. D. (2011). Kecepatan penyerapan zat organik pada limbah cair industri tahu dengan lumpur aktif. *Momentum*, 7(1), 41–47. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.36499/jim.v7i2.100>
- Saputra, E., & Hanum, F. (2016). Pengaruh jarak antara elektroda pada reaktor elektrokoagulasi terhadap pengolahan effluent limbah cair pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 5(4), 33–38.
- Setiawan, A., Jati, D. R., & Saziati, O. (2021). Penerapan produksi bersih industry kecil tahu di jalan parit pangeran siantan Pontianak. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Tropis*, 2(1), 1–10.
- Sintawardani, N., Widyarani, Hamidah, U., Wulan, D. R., & Nilawati, D. (2022). Recovery of Energy and Materials From Small-Scale Tofu Processing Industries in Indonesia. In P. Ordóñez de Pablos, X. Zhang, & M. N. Almunawar (Eds.), *Handbook of Research on Green, Circular, and Digital Economies as Tools for Recovery and Sustainability*: (pp. 231–256). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9664-7.ch013>
- Suyanta, Sunarto, Kristianingrum, S., Padmaningrum, R. T., Salsabilla, D., & Karlinda. (2022). Treatment of industrial wastewawter and household waste using electrocoagulation method with aluminum electrode. *Indonesian Journal of Chemistry and Environment*, 5(2), 37–43.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.
- Wardhani, E., Dirgawati, M., & Valyana, K. P. (2012). Application of electrocoagulation method for leather tanning industrial waste water treatment. *Seminar Ilmiah Nasional, Masalah Lingkungan Di Indonesia 8*, Kampus Universitas Gadjah Mada, 1–16.
- Wiyanto, E., Harsono, B., Makmur, A., Pangputra, R., & Kurniawan, M. S. (2014). Penerapan elektrokoagulasi dalam proses dalam proses penjernihan limbah cair. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 12(1), 19–36.
- Yuliyani, L., & Widayatno, T. (2020). Pengaruh variasi waktu tinggal dan kuat arus terhadap penurunan kadar COD, TSS dan BOD limbah cair industri tahu menggunakan elektrokoagulasi secara kontinyu. *Proceeding of The 11th University Research Colloquium 2020: Bidang Sains Dan Teknologi*, 45–48.