



# UJI KINERJA METODE ELEKTROKOAGULASI MENGGUNAKAN ELEKTRODA ALUMINIUM (Al) UNTUK PENYISIHAN LOGAM Fe DAN Mn PADA AIR BERSIH BERDASARKAN EFISIENSI PENYISIHAN DAN KONSUMSI ENERGI

Ibrahim<sup>1\*</sup>, Yuniarto Setiawan<sup>1</sup>, Dwi Ermawati Rahayu<sup>1</sup>, Ridwan Adi Surya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Mulawarman, Samarinda. Jalan Sambaliung No. 9 Kampus Gunung Kelua Samarinda 75119

<sup>2</sup>Jurusan Ilmu Lingkungan, Fakultas Kehutanan dan Ilmu Lingkungan, Universitas Haluoleo

\*Korespondensi penulis: [ibrah.brahim@ft.unmul.ac.id](mailto:ibrah.brahim@ft.unmul.ac.id)

## ABSTRAK

Air tanah sebagai sumber air bersih masih menjadi pilihan utama oleh Sebagian besar masyarakat karena alasan murah dan bisa langsung dimanfaatkan. Namun, kondisi air tanah saat ini semakin banyak yang tidak memenuhi kualitas air bersih seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk. Salah satu masalah air bersih yang sering dijumpai adalah kontaminasi logam terutama Fe dan Mn. Elektrokoagulasi adalah salah satu metode pengolahan air yang ekonomis, praktis, dan mudah dioperasikan sebagai solusi permasalahan tersebut. Penelitian dilakukan dengan menguji kinerja metode elektrokoagulasi untuk mendapatkan efisiensi penyisihan optimum serta konsumsi energi optimum untuk penyisihan logam Fe dan Mn dalam air bersih. Data efisiensi penyisihan optimum dan konsumsi energi optimum diperoleh dari elektrokoagulasi dengan memberikan variasi waktu 5, 10, 15, 20, 25, 30 menit. Dari hasil penelitian ini efisiensi penyisihan optimum dihasilkan sebesar 66,28 % pada t = 30 menit untuk Fe dan Mn sebesar 61,88 % pada t = 30 menit. Konsumsi energi optimum penyisihan logam Fe diperoleh 2,42 kWh/m<sup>3</sup> pada t = 30 menit dan logam Mn sebesar 2,14 kWh/m<sup>3</sup> pada t = 30 menit.

**Kata Kunci:** Elektrokoagulasi, Elektroda, Efisiensi Penyisihan, Konsumsi Energi

## 1. Pendahuluan

Manusia mempunyai kebutuhan pokok yaitu air yang tidak dapat tergantikan, dan setiap waktu manusia mengalami kenaikan jumlah populasi dipermukaan bumi yang menyebabkan meningkatnya penggunaan air. Fakta ini tentunya akan berdampak pada ketersediaan air yang semakin sulit didapatkan. Hal ini juga yang menjadi penyebab besarnya penggunaan air tanah untuk memenuhi kebutuhan air bersih yang akan digunakan untuk keperluan sehari-hari karena alasan air bersih yang bersumber dari tanah selain murah juga bisa langsung digunakan. Penggunaan air tanah sebagai sumber air bersih secara ekonomis memang lebih murah, namun masalah yang sering terjadi adalah kualitas air tanah yang digunakan tidak memenuhi standar kualitas air bersih akibat terjadinya pencemaran lingkungan yang baik itu disebabkan oleh aktifitas manusia yang semakin bertambah maupun karena faktor alam itu sendiri.

Secara umum, air bersih didefinisikan sebagai air yang jernih, tanpa warna, tanpa rasa, dan tidak ada bau yang ditimbulkan. sehingga, ketersediaan air bersih sangat diperlukan untuk menunjang berbagai macam kebutuhan dan aktivitas manusia sehari-hari [1]. Air tanah yang tidak memenuhi standar kualitas air bersih akan memberikan dampak baik itu pada manusia maupun hewan yang ada disekitarnya. Salah satu indikator rendahnya kualitas air bersih yang sering terdeteksi adalah Keberadaan logam Fe yang berlebih dan pH yang rendah. Beberapa dampak langsung tersebut adalah air terasa pahit-asam, timbulnya bau yang tidak enak, dan air berwarna kuning kecoklatan [2]. Moore telah melaporkan bahwa Kadar besi >1 mg/l dianggap membahayakan bagi kehidupan organisme akuatik [3], sehingga akan memberikan dampak pada biota air



Pemenuhan kualitas air bersih yang sesuai dengan standar kualitas air bersih dewasa ini telah banyak dilakukan dengan berbagai metode pengolahan air bersih, namun kebanyakan metode-metode itu secara ekonomis dirasakan masih mahal dan kurang praktis untuk pemenuhan keperluan sehari-hari karena metode-metode yang telah ada sistem pengoperasiannya tidak sederhana, membutuhkan konsumsi energi yang besar, membutuhkan *space* (ruang) yang besar dan masih sulit didapatkan. Berangkat dari masalah ini maka metode elektrokoagulasi dalam pengolahan air bersih mampu menjawab permasalahan tersebut. Mollah memberikan gambaran salah satu keuntungan dari metode ini dari sekian banyak keuntungan yang telah dilaporkannya adalah elektrokoagulasi hanya membutuhkan peralatan yang sederhana dan mudah dioperasikan [4]. Kemudian, keunggulan lain dari metode ini juga dilaporkan oleh Kamilul, yaitu metode elektrokoagulasi tidak memerlukan bahan kimia, sehingga tidak menimbulkan masalah dengan netralisasi. Kemudian lebih cepat mereduksi kandungan koloid yang paling kecil, hal ini karena medan listrik digunakan dalam air sehingga mempercepat gerakan sehingga proses pengendapan lebih mudah [5].

Berdasarkan pemaparan di atas, maka penelitian ini dirasa perlu dilakukan untuk mengkaji kinerja metode ini khususnya proses penyisihan logam Fe dan Mn pada air dan melihat seberapa besar penggunaan energi yang dibutuhkan untuk proses tersebut mengingat efisiensi biaya yang harus diperhitungkan jika menggunakan metode elektrokoagulasi dalam pengolahan air. Penelitian ini akan memberikan gambaran kelayakan metode elektrokoagulasi untuk proses pengolahan air sehingga dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam pemilihan metode pengolahan air terutama untuk penyisihan logam-logam terlarut dalam air.

## 2. Metode Penelitian

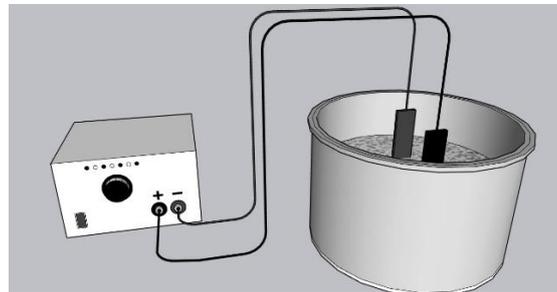
Metode penelitian yang digunakan menggunakan metode penelitian eksperimen yang mengacu pada sistem kerja proses elektrokoagulasi logam terlarut dalam air bersih dimana variabel-variabel yang menjadi penentu kinerja proses elektrokoagulasi diuji menggunakan jenis elektroda Aluminium (Al) dan logam pencemar yang menjadi target penyisihan dalam proses elektrokoagulasi adalah Fe dan Mn [6]. Dalam penelitian ini, variabel yang akan diuji adalah Efisiensi penyisihan (EP) dan Konsumsi energi (KE) sebagai variabel terikat kemudian jumlah kuat arus dan waktu sebagai variabel bebas. Peralatan yang digunakan diantaranya *DC Power Supply*, Elektroda Aluminium 1 cm x 8 cm x 0,5 cm, *Beaker glass (250 ml)*, Labu Ukur (100 mL dan 1000 mL), Pipet Volumetrik (5 mL, 10 mL, dan 25 mL), pH meter, Gelas Ukur (150 mL dan 250 mL), *stopwatch*, *Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)*, Adapun bahan yang digunakan adalah *iron (Fe) Standart Solution 100 mg/L*, *Manganese (Mn) Standart Solution 100 mg/L*, dan aquabides.

### Preparasi Sampel

Pembuatan larutan Fe 2,5 mg/L sebanyak 1 L dan larutan Mn 2,5 mg/L sebanyak 1 L masing-masing dibuat dari *iron (Fe) Standart Solution 100 mg/L* dan *Manganese (Mn) Standart Solution 100 mg/L* sebagai *Stock* sampel uji kemudian pH masing-masing larutan diukur. *Stock* sampel uji diambil sebanyak 150 mL untuk setiap pengujian, sehingga setiap 1 L *stock* sampel dihasilkan masing-masing enam sampel uji untuk proses elektrokoagulasi.

### Pengolahan Sampel Uji

Proses pengolahan sampel uji menggunakan *DC Power Supply* dengan kondisi pengukuran diatur pada 20,74 V, jarak elektroda 1 cm, dan kedalaman elektroda yang tercelup dalam sampel sedalam 6 cm. Kondisi pengukuran ini digunakan pada pengolahan sampel uji masing-masing untuk penyisihan logam Fe dan logam Mn dengan variasi waktu elektrokoagulasi berturut-turut adalah 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 menit. Larutan sampel uji yang akan diolah terlebih dahulu dilakukan pengukuran pH, kemudian dilakukan pengolahan sesuai variasi waktu yang ditetapkan. Sampel uji yang telah diolah kembali dilakukan pengukuran pH untuk melihat perubahan pH setelah diolah, Tahap selanjutnya adalah sampel disaring, kemudian dilanjutkan pengukuran kadar logam Fe dan Mn dalam sampel uji menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* pada tiap variasi waktu. Rangkaian alat untuk proses Elektrokoagulasi dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Rangkaian Alat Metode Elektrokoagulasi

### 3. Hasil dan Pembahasan Perubahan pH

Data perubahan pH setelah pengolahan sampel uji disajikan pada **Tabel 1**. Data ini untuk melihat perubahan pH larutan uji sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi

Tabel.1 Perubahan pH Larutan Uji Setelah Proses Elektrokoagulasi

pH Larutan Sebelum Elektrokoagulasi		Durasi Waktu Elektrokoagulasi (menit)	pH Larutan Setelah Elektrokoagulasi	
Fe	Mn		Fe	Mn
3,16	3,09	5	5,16	6,16
		10	5,06	6,17
		15	5,07	6,21
		20	5,08	6,15
		25	5,08	6,16
		30	5,04	6,17

Dari **Tabel 1**, terlihat kenaikan pH selama proses elektrokoagulasi dalam kurun waktu 30 menit, kenaikan ini mengindikasikan bahwa pada permukaan katoda dihasilkan spesies ion  $\text{OH}^-$  selama proses elektrokoagulasi [7]. Ion  $\text{OH}^-$  merupakan hasil reaksi reduksi air pada katoda sebagaimana yang digambarkan oleh Bharath *et al.* [8] jika menggunakan elektroda berbahan Aluminium (Al), yaitu:



Terbentuknya spesies ion  $\text{OH}^-$  dari mekanisme reaksi reduksi air terjadi secara bersamaan dengan reaksi oksidasi yang berlangsung pada Anoda dengan mekanisme sebagai berikut:



Reaksi oksidasi-reduksi yang berlangsung pada kedua elektroda tersebut selama proses elektrokoagulasi akan menghasilkan spesies-spesies monomerik dan polimerik yang pada akhirnya membentuk koagulan  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Pada proses Elektrokoagulasi pH awal merupakan salah satu parameter yang terpenting dimana pH



larutan mempengaruhi sifat logam Hidroksida dan polutan disamping itu nilai pH secara langsung dapat mempengaruhi proses oksidasi elektroda pada anoda [9]. Pada pH 3 – 5 elektroda bereaksi menghasilkan ion-ion  $\text{Al}^+$  dan  $\text{OH}^-$  untuk membentuk berbagai macam spesies-spesies monomerik dan polimerik [10]. Ketika pH berada pada 5 -7, maka selanjutnya terbentuk kompleks Monomerik Alumunium dan kompleks Alumunium Polimerik ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_4^+$ , dan  $\text{Al}_{17}(\text{OH})_{32}^{7+}$  yang berkontribusi pada pembentukan koagulan [11].

### Efisiensi Penyisihan (%) Logam Fe dan Mn

Kinerja proses elektrokoagulasi yang maksimal ditandai dengan besarnya efisiensi penyisihan polutan. Secara teoritis, besarnya efisiensi penyisihan dinyatakan dengan **Persamaan 3** sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Penyisihan}(\%) = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \quad (3)$$

dimana  $C_o$  adalah konsentrasi sebelum proses elektrokoagulasi (ppm) dan  $C_t$  adalah konsentrasi sesudah proses elektrokoagulasi (ppm) [12].

Pada prinsipnya, elektrokoagulasi merupakan proses elektrokimia untuk mendestabilisasi muatan polutan menggunakan arus listrik yang akan mengurai elektroda untuk memerangkap polutan dalam “flok”, sehingga polutan dapat dipisahkan dari larutan elektrolit [13]. Berkaca pada data efisiensi penyisihan logam Fe pada **Tabel 2**, terlihat bahwa faktor utama yang berpengaruh adalah lamanya proses elektrokoagulasi serta besarnya arus listrik yang digunakan pada sistem elektrokoagulasi pada setiap variasi waktu. Data yang dihasilkan dari penelitian ini memperlihatkan pengaruh lamanya waktu elektrokoagulasi lebih signifikan dibandingkan kuat arus. Data efisiensi penyisihan pada masing-masing logam Fe dan Mn disajikan dalam **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Efisiensi Penyisihan Logam Fe dan Mn (Pada Kondisi: Voltase = 20 V, jarak elektroda = 1 cm, kedalaman elektroda dalam larutan = 6 cm)

Durasi Waktu Elektrokoagulasi (menit)	Kuat Arus (A)		Efisiensi Penyisihan (%)	
	Fe	Mn	Fe	Mn
5	0,047	0,045	42,52	24,76
10	0,031	0,041	36,16	32,56
15	0,039	0,047	39,36	27,12
20	0,036	0,032	40,52	42,36
25	0,034	0,022	54,56	47,8
30	0,035	0,031	66,28	61,88

Pada **Tabel 2**, terlihat bahwa nilai efisiensi penyisihan pada  $t = 5$  menit lebih besar dari  $t = 10$  menit,  $t = 15$  menit, dan  $t = 20$  menit. Maka, dapat dijelaskan kemungkinan konsentrasi oksigen terlarut dalam larutan pada proses elektrokoagulasi selama  $t = 5$  menit lebih besar dibandingkan pada elektrokoagulasi selama  $t = 10$  menit,  $t = 15$  menit dan  $t = 20$  menit. Kelebihan kadar oksigen di sekeliling logam mendorong lebih kuat logam tersebut mengalami proses oksidasi [14], dalam hal ini anoda sehingga spesies  $\text{Al}^{3+}$  lebih cepat dihasilkan, Dengan demikian,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  yang berperan sebagai koagulan dalam proses presipitasi logam pencemar dalam larutan cepat terbentuk namun dengan konsekuensi penggunaan arus listrik yang besar.



Dari variasi waktu yang diberikan dalam proses elektrokoagulasi, terlihat bahwa efisiensi penyisihan pada saat  $t = 5$  menit sebesar 42,52 %, nilai ini kemudian menurun pada saat  $t = 10$  menit dengan efisiensi penyisihan sebesar 36,16 %. Efisiensi penyisihan mulai menunjukkan kenaikan berturut-turut dari  $t = 15$  menit sebesar 39,36 %,  $t = 20$  menit sebesar 40,52 %,  $t = 25$  menit sebesar 54,56 %, dan  $t = 30$  menit sebesar 66,28 %. Dari data efisiensi penyisihan yang diperoleh, dimulai pada  $t = 10$  menit sampai  $t = 30$  menit, terlihat bahwa besarnya arus listrik yang terpakai tidak selalu berbanding lurus dengan besarnya penyisihan. Hal ini terlihat pada pada  $t = 20$  menit dengan efisiensi penyisihan 40,52 % kuat arus yang terukur sebesar 0,036 A, jika dibandingkan dengan efisiensi penyisihan berturut-turut pada  $t = 25$  dan  $t = 30$  adalah 54,26 % dan 66,28 % masing-masing memperlihatkan penggunaan kuat arus yang lebih kecil sebesar 0,034 A dan 0,035 A, sehingga efisiensi penyisihan optimal untuk logam Fe pada  $t = 30$  menit sebesar 66,28 %. Kemudian, untuk penyisihan logam Mn, terlihat naiknya efisiensi penyisihan secara berurutan dimulai pada  $t = 20$  menit sebesar 42,36 %,  $t = 25$  menit sebesar 47,8 %, dan  $t = 30$  menit sebesar 61,8 %, dimana kuat arus yang digunakan berturut turut adalah 0,032 A, 0,022 A, dan 0,031 A, Nilai ini lebih kecil dibandingkan dengan besarnya penggunaan arus listrik pada  $t = 5$  menit,  $t = 10$  menit, dan  $t = 15$  menit dengan efisiensi penyisihan yang kecil. Efisiensi penyisihan optimal logam Mn selama proses elektrokoagulasi diperoleh pada  $t = 30$  menit dengan sebesar 61,88 %. Dari dasar ini, kemudian ditentukan besar efisiensi penyisihan optimal untuk logam Fe dan Mn dengan melihat efisiensi penyisihan yang paling maksimal dengan penggunaan kuat arus sekecil mungkin.

#### Konsumsi Energi Elektrokoagulasi (kWh/m<sup>3</sup>)

Pada proses elektrokoagulasi besarnya penyisihan kontaminan umumnya proporsional dengan besarnya arus yang digunakan dan lamanya elektrokoagulasi [15]. Jumlah konsumsi energi persatuan volume dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 4** di bawah ini:

$$E = \frac{(P).(I).(t)}{V} \quad (4)$$

di mana  $E$  adalah Besarnya Konsumsi Energi (kWh/m<sup>3</sup>),  $P$  adalah jumlah tegangan listrik yang digunakan (V),  $I$  adalah jumlah arus listrik yang digunakan (A),  $t$  adalah waktu reaksi (jam), dan  $V$  adalah volume air yang digunakan (L) [16].

Data konsumsi energi diperoleh dari proses elektrokoagulasi larutan Fe dan Mn dengan variasi waktu 5, 10,15, 20, 25, dan 30 menit disajikan pada **Tabel 3**. Pada penyisihan logam Fe, konsumsi energi mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu, yang paling kecil pada elektrokoagulasi selama 5 menit sebesar 0,54 kWh/m<sup>3</sup> dan paling besar diperoleh pada elektrokoagulasi selama 30 menit sebesar 2,42 kWh/m<sup>3</sup>.

**Tabel 3.** Jumlah Konsumsi Energi Proses Elektrokoagulasi pada Tiap Variasi Waktu (Pada Kondisi: Voltase = 20 V, jarak elektroda = 1 cm, kedalaman elektroda dalam larutan = 6 cm)

Tegangan Listrik (V)	Arus Listrik (A)		Durasi Waktu Elektrokoagulasi (menit)	Konsumsi Energi (kWh/m <sup>3</sup> )	
	Fe	Mn		Fe	Mn
20,74	0,047	0,045	5	0,54	0,52
	0,031	0,041	10	0,72	0,95
	0,039	0,047	15	1,35	1,62
	0,036	0,032	20	1,64	1,47
	0,034	0,022	25	1,97	1,27
	0,035	0,031	30	2,42	2,14



Penyisihan logam Mn menunjukkan konsumsi energi paling kecil pada proses elektrokoagulasi selama 5 menit sebesar 0,52 kWh/m<sup>3</sup> dan yang paling besar pada proses elektrokoagulasi selama 30 menit sebesar 2,14 kWh/m<sup>3</sup>. Adapun penurunan konsumsi energi untuk logam Mn terjadi pada proses elektrokoagulasi selama 20 menit dan 30 menit. Kondisi larutan selama berlangsungnya proses elektrokoagulasi juga mempengaruhi terhadap besar kecilnya konsumsi energi, meskipun secara teoritis yang bisa terlihat adalah kuat arus dan lamanya waktu elektrokoagulasi. Penurunan konsumsi energi pada t = 20 menit dan t = 25 menit untuk logam Mn sesuai dengan arus listrik yang digunakan pada dua waktu tersebut yang relatif kecil dibandingkan pada t = 5 menit, t = 10 menit, dan 15 menit. Hal ini dapat dijelaskan bahwa seiring dengan bertambahnya waktu elektrokoagulasi, pH larutan semakin naik, yang menyebabkan arus listrik yang dihantarkan semakin kecil akibat berkurangnya ion dalam larutan. Berkurangnya ion dalam larutan terjadi saat terjadi pembentukan koagulan Al(OH)<sub>3</sub>. Secara umum, pada rentang pH 6 sampai 8, pembentukan Al(OH)<sub>3</sub> akan optimal [17], dimana Al(OH)<sub>3</sub> merupakan flok koagulan yang melakukan penyisihan ion-ion logam Fe maupun Mn. Mekanisme flok koagulan ini dalam penyisihan ion-ion logam yaitu adanya tarikan elektrostatik antara pencemar logam dan flok koagulan karena keberadaan area muatan positif semu dan area muatan negatif semu pada flok. Muatan negatif semu di sekitar flok menarik logam dalam larutan akibatnya terjadi koagulasi disekitar flok dan akhirnya mengendap [18]. Konsumsi energi optimum, baik itu logam Fe maupun Mn, berada pada t = 30 menit dengan asumsi bahwa penggunaan arus listrik pada waktu tersebut lebih kecil yaitu 0,035 A untuk logam Fe dan 0,031 A untuk logam Mn, tetapi konsumsi energi yang terhitung paling besar diantara semua variasi waktu. Dengan demikian, data penelitian yang diperoleh memberikan gambaran bahwa yang paling berpengaruh terhadap besar kecilnya konsumsi energi adalah lamanya waktu elektrokoagulasi, baik itu logam Fe maupun Mn keduanya memberikan nilai konsumsi energi yang paling besar pada t = 30 menit.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian, maka dihasilkan kesimpulan:

1. Efisiensi penyisihan logam Fe optimal berada pada t = 30 menit sebesar 66,28 % dimana elektrokoagulasi selama 30 menit ini menunjukkan pemakaian arus listrik yang relatif kecil dengan efisiensi penyisihan paling besar di antara semua variasi waktu. Hasil yang sama untuk logam Mn didapatkan Efisiensi Penyisihan optimal pada t = 30 menit sebesar 61,88 % dengan pemakaian arus listrik kecil memberikan efisiensi penyisihan paling besar diantara semua variasi waktu.
2. Konsumsi energi logam Fe menunjukkan kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu elektrokoagulasi dengan konsumsi energi yang paling kecil sebesar 0,54 kWh/m<sup>3</sup> pada t = 5 menit dan yang paling besar adalah 2,42 kWh/m<sup>3</sup> pada t = 30 menit, sedangkan untuk logam Mn yang paling kecil sebesar 0,52 kWh/m<sup>3</sup> pada t = 5 menit dan paling besar adalah 2,14 kWh/m<sup>3</sup> pada t = 30 menit namun untuk logam Mn penurunan konsumsi energi terjadi pada t = 20 menit dan t = 25 menit. Dengan demikian, besarnya konsumsi energi selain dipengaruhi oleh waktu elektrokoagulasi juga oleh cepat atau lambatnya terbentuk koagulan Al(OH)<sub>3</sub> selama proses elektrokoagulasi.
3. Terbentuknya koagulan Al(OH)<sub>3</sub> pada proses elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, beberapa diantaranya adalah konsentrasi oksigen terlarut dalam larutan, pH larutan, dan jenis elektroda.

#### Referensi

- [1] L. Febrina dan A. Ayuna, "Studi Penurunan Kadar Besi (Fe) Dan Mangan (Mn) Dalam Air Tanah Menggunakan Saringan Keramik," *Jurnal Teknologi*, vol. 7, no. 1, 2015, doi: 10.24853/jurtek.7.1.35-44. [Online]. Tersedia: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/jurtek/article/view/369>.
- [2] L. Harimu, A. Haetami, C. P. Sari, H. Haeruddin, dan N. Nurlansi, "Perbandingan Kemampuan Aerasi Sembur (*Spray*) dengan Metode Adsorpsi Menggunakan Adsorben Serbuk Kulit Buah Kakao untuk Menurunkan Kadar Besi dan Mangan Pada Air Sumur Gali," *Indonesian Journal Chemical. Research*,



- vol. 8, no. 2, pp. 137–143, Sep. 2020, doi: 10.30598/ijcr.2020.8-hrm. [Online]. Tersedia: <http://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/ijcr>
- [3] D. Budianta, “Toksisitas Logam Besi (Fe) pada Ikan Air Tawar,” *Jurnal Penelitian Sains*, vol.17, no.1, 2014, doi: 10.56064/jps.v17i1.45. [Online]. Tersedia: <http://ejurnal.mipa.unsri.ac.id/index.php/jps/article/view/45>.
- [4] D. S. E. Guna, E. Ariyanto, dan H. Juniar, “Purifikasi Methyl Blue Dengan Metode Elektrokoagulasi Proses Menggunakan Aluminium (Al) Sebagai Plat Elektroda,” *Jurnal Distilasi*, vol. 4, no.1, pp. 21-30, 2019, doi: 10.32502/jd.v4i1.2215. [Online]. Tersedia: <https://jurnal.um-palembang.ac.id/distilasi/article/view/2215>.
- [5] I. Amri, P. Destinefa, dan Zultiniar, “Pengolahan limbah cair tahu menjadi air bersih dengan metode elektrokoagulasi secara kontinyu,” *Chempublish Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 57–67, 2020, doi: <https://doi.org/10.22437/chp.v5i1.7651>. [Online]. Tersedia: <https://online-journal.unja.ac.id/chp/article/view/7651>.
- [6] E. Wiyanto, B. Harsono, A. Makmur, R. Pangputra, dan M. S. Kurniawan, “Penerapan Elektrokoagulasi Dalam Proses Penjernihan Limbah Cair,” *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 19–36, 2014. doi: <https://doi.org/10.25105/jetri.v12i1.1449>. [Online]. Tersedia: <https://www.trijurnal.trisakti.ac.id/index.php/jetri/article>
- [7] M. Kobya, R. D. C. Soltani, P. I. Omwene, dan A. Khataee, “A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: Reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms,” *Environmental Technology and Innovation*, vol. 17, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100519>. [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186419304146>.
- [8] M. Bharath, B. M. Krishna, dan B. Manoj Kumar, “Degradation and biodegradability improvement of the landfill leachate using electrocoagulation with iron and aluminum electrodes: A comparative study,” *Water Practice & Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 540–549, 2020, doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.041>. [Online]. Tersedia: <https://iwaponline.com/wpt/article/15/2/540/74135/Degradation-and-biodegradability-improvement-of>
- [9] R. Zhou, F. Liu, N. Wei, C. Yang, J. Yang, Y. Wu, Y. Li, K. Xu, X. Chen, dan C. Zhang, “Comparison of Cr(VI) removal by direct and pulse current electrocoagulation: Implications for energy consumption optimization, sludge reduction and floc magnetism,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101387>. [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420302658?via%3Dihub>.
- [10] P. Song, Z. Yang, H. Xu, J. Huang, X. Yang, F. Yue, dan L. Wang, “Arsenic removal from contaminated drinking water by electrocoagulation using hybrid Fe–Al electrodes: response surface methodology and mechanism study,” *Desalination Water Treatment*, vol. 57, no. 10, pp. 4548–4556, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.992973>. [Online]. Tersedia: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19443994.2014.992973>
- [11] P. Song, C. Sun, J. Wang, S. Ai, S. Dong, J. Sun, dan S. Sun, “Efficient removal of Cu-EDTA complexes from wastewater by combined electrooxidation and electrocoagulation process: Performance and mechanism study,” *Chemosphere*, vol. 287, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131971>. [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521024437?via%3Dihub>
- [12] Z. A. Hawass dan F. Y. AlJaberi, “Effect of mono and bipolar connection modes on the electrocoagulation removal efficiency of multi-heavy metals from simulated wastewater,” *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 048–054, 2022, doi: <https://doi.org/10.30772/qjes.v15i1.813>. [Online]. Tersedia: <https://qu.edu.iq/journaleng/index.php/QJES/article/view/813>



- [13] A. Tahreen, M. S. Jami, dan F. Ali, "Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440> . [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420303184>
- [14] G. Fauzi, M. D. Gumelar, G. Taqwatomo, D. Ronald, dan T. Waluyo, "Pengaruh Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Laju Korosi Pada Baja ASTM 36," *Jurnal Inovasi dan Teknologi Material*, vol. 2, no. 2, 2021, doi: <https://doi.org/10.29122/jitm.v2i2.5142> . [Online]. Tersedia: <https://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JITM/article/view/5142> .
- [15] B. K. Zaied, M. Rashid, M. Nasrullah, A. W. Zularisam, D. Pant, dan L. Singh, "A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process," *Science of the Total Environment*, vol. 726, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138095>. [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720316089>
- [16] M. Al-Shannag, Z. Al-Qodah, K. Bani-Melhem, M. R. Qtaishat, dan M. Alkasrawi, "Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance," *Chemical Engineering Journal*, vol. 260, pp. 749–756, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.035>. [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894714012212?via%3Dihub>
- [17] A. Rehman, M. Kim, A. Reverberi, dan B. Fabiano, "Operational parameter influence on heavy metal removal from metal plating wastewater by electrocoagulation process," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 43, pp. 2251–2256, 2015, doi: <https://doi.org/10.3303/CET1543376>. [Online]. Tersedia: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET1543376> .
- [18] S. Garcia-Segura, M. M. S. G. Eiband, J. V. de Melo, dan C. A. Martínez-Huitle, "Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 801, pp. 267–299, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>. [Online]. Tersedia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1572665717305337?via%3Dihub>