

PENGARUH WAKTU KONTAK DAN JENIS PASANGAN ELEKTRODA DALAM PROSES ELEKTROKOAGULASI TERHADAP pH dan TSS AIR ASAM TAMBANG

SEARPHIN NUGROHO^{1*}, IKA MEICAHAYANTI¹, ANDINI ADI PUTRI¹

1. Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman
Email: searphin91@gmail.com

ABSTRAK

Air asam tambang (AAT) merupakan salah satu limbah dari aktifitas pertambangan batu bara yang berpotensi membahayakan lingkungan di sekitarnya dikarenakan oleh karakteristiknya seperti nilai pH yang rendah serta mengandung logam-logam berat. Salah satu alternatif pengolahan yang dapat digunakan terhadap AAT ialah elektrokoagulasi, dimana terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi efektivitas kinerja metode ini dalam mengolah limbah. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel jenis plat serta waktu kontak terhadap kemampuan elektrokoagulasi dalam menetralkan pH dan menurunkan TSS pada AAT. Percobaan pengolahan AAT dilakukan dengan metode elektrokoagulasi dalam skala laboratorium menggunakan variasi plat Al-Al dan plat Al-Fe serta variasi waktu kontak 0, 45, 90, 120, 150, dan 180 menit, dimana setiap variasi plat dilakukan 2 kali pengulangan. Hasil penelitian yang didapatkan ialah baik variasi plat Al-Al maupun Al-Fe mampu menaikkan nilai pH dari keadaan asam menuju kondisi netral, serta mampu menyisihkan parameter TSS dengan sebesar 98% untuk variasi plat Al-Al dan sebesar 95% untuk plat Al-Fe. Pengaruh waktu kontak terhadap nilai pH yang didapatkan ialah berupa tren meningkat hingga 120 menit dan selanjutnya terjadi fluktuasi yang rendah, sedangkan pada parameter TSS didapatkan tren penurunan konsentrasi seiring waktu berjalan.

Kata kunci: air asam tambang, elektrokoagulasi, plat elektroda, waktu kontak

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is one of the wastes from coal mining activities that has abilities to harm the surrounding environment due to its characteristics, such as a low pH value and containing heavy metals. One alternative treatment that can be used to treat AMD is electrocoagulation, where several factors can influence the effectiveness of this method in treating waste. This research was conducted to determine the effect of variable plate type and contact time on the ability of electrocoagulation to neutralize pH and reduce TSS in AMD. The experiments were carried out using the electrocoagulation method on a laboratory scale using variations of Al-Al and Al-Fe plates and variations of contact time of 0, 45, 90, 120, 150, and 180 minutes, where each plate variation was carried out twice. The research showed that both plate variations could increase the pH value from acidic to neutral conditions and set TSS parameters by 98% for Al-Al plate variations and 95% for Al-Fe plates. The effect of contact time on the pH value is in the form of an increasing trend up to 120 minutes, then low fluctuations occur, while for the TSS parameter, there is a trend of decreasing concentration over time.

Keywords: acid mine drainage, contact time, electrocoagulation, electrode plates

1. PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan batu bara berpotensi memberikan perubahan terhadap lingkungan, seperti perubahan fisik dan kimia. Perubahan fisik akan memberikan pengaruh terhadap perubahan morfologi dan topografi lahan, sedangkan perubahan kimia akan berpengaruh terhadap kualitas air tanah beserta air permukaan (Said, 2014). Salah satu potensi penyebab dari perubahan terhadap lingkungan di kawasan pertambangan batu bara ialah terbentuknya air asam tambang (AAT) (Anshariah dkk., 2015). Air asam tambang (AAT) merupakan air limbah hasil dari kegiatan pertambangan yang disebabkan oleh terbukanya batuan sulfida, dimana mengandung pirit beserta mineral sulfida lainnya serta kemudian bereaksi dengan udara serta air (Kaharapenni dan Noor, 2015; Tom dkk., 2020). Ketika proses penambangan, terjadi oksidasi bahan material sulfida, seperti pirit yang terekspos ke permukaan tanah dan mengalami proses kimia dan biologi. Proses keduanya menyebabkan terbentuknya sulfat dengan derajat keasaman yang tinggi (Wahyudin dkk., 2018), yang merupakan suatu kondisi yang mendukung terbentuknya AAT (Hidayah dkk., 2020).

Terbentuknya AAT tergantung pada mekanisme penambangan dan kondisi cuaca. Air hujan beserta air tanah yang bercampur dengan batuan sulfida yang terkandung dalam batu bara akan memiliki pH sangat asam dan mengandung Fe dan Mn (Wahyudin dkk., 2018). AAT memiliki pH antara 2-4 dan mengandung logam berat (Alam dkk., 2022). AAT juga memiliki total padatan tersuspensi (TSS) yang tinggi karena air limpasan berpotensi untuk melarutkan partikel padatan yang halus dan membutuhkan waktu lama untuk pengendapan. Padatan dapat berasal dari mineral-mineral dan zat organik, seperti pasir halus, silt, lempung dan zat organik berupa asam humus dan asam vulvat (Said, 2014).

Karakteristik dari AAT menunjukkan bahwa air limbah ini berbahaya bagi lingkungan perairan di sekitar kegiatan penambangan (Alam dkk., 2022). Hal ini dikarenakan oleh potensinya yang dapat membahayakan serta merusak ekosistem perairan seperti sungai, danau, atau rawa apabila langsung dilepas ke badan air tersebut. Keberadaan AAT tidak hanya penurunan kualitas air, tetapi juga memberikan dampak terhadap perubahan pola aliran permukaan dan air tanah, komposisi kimia badan air permukaan, bentang alam, dan perubahan struktur tanah (Hidayat, 2017). Tercemarnya badan air seperti sungai oleh AAT, di mana sungai tersebut dimanfaatkan oleh masyarakat untuk beraktivitas, berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan seperti penyakit kulit atau gatal-gatal, gangguan pencernaan, gangguan pada organ paru-paru serta kanker otak (Fatmawati dkk., 2018). Dampak lainnya yang dapat disebabkan oleh AAT ialah peralatan milik perusahaan pertambangan berbahan baja atau besi dapat mengalami kerusakan yang semakin cepat dikarenakan meningkatnya laju korosif pada peralatan tersebut, sehingga berdampak terhadap keadaan finansial dari perusahaan yang bersangkutan (Hidayah dkk., 2020). Hal ini menyebabkan diperlukan upaya untuk mengurangi berbagai dampak merugikan dari AAT tersebut, diantaranya ialah melalui pengolahan.

Pengolahan terhadap AAT diperlukan untuk menghilangkan polutan yang terkandung di dalamnya, sehingga air dapat dibuang ke badan air penerima tanpa menimbulkan potensi pencemaran. Pengolahan air limbah pada umumnya menggunakan sistem konvensional yang terdiri dari pengolahan fisik, kimia, biologi, serta rangkaian dari kombinasi ketiganya. Pengolahan fisik hanya terbatas pada parameter yang dapat dilakukan secara fisik, seperti total padatan tersuspensi. Pengolahan kimia menggunakan bahan kimia yang menghasilkan lumpur dalam jumlah besar. Pengolahan biologi membutuhkan luas area yang besar dan membutuhkan waktu yang lama (Alam dkk., 2022). AAT pada umumnya diolah dengan pengolahan fisik kimia dengan proses koagulasi konvensional dengan penambahan bahan

kimia (Wahyudin dkk., 2018). Upaya dalam melakukan netralisasi pH AAT dengan cepat dan efektif dapat dilakukan dengan menggunakan bahan kimia (Tom dkk., 2020). Penambahan bahan kimia bertujuan untuk menurunkan kestabilan polutan dengan pengadukan dan pengendapan sehingga polutan dapat terpisahkan (Suhan dan Islam, 2022). Penambahan bahan kimia dilakukan di *settling pond*, yang merupakan kolam untuk pengolahan AAT (Wahyudin dkk., 2018). Selain koagulasi konvensional dengan bahan kimia, AAT juga dapat diolah dengan elektrokoagulasi (Alam dkk., 2022). Teknologi ini dinilai lebih efektif karena dapat mengatasi kelemahan dari pengolahan klasik (Oncel dkk., 2013), seperti koagulasi dengan bahan kimia.

Elektrokoagulasi merupakan alternatif pengolahan untuk beberapa jenis air limbah yang sudah diaplikasikan secara luas dalam menghilangkan kontaminan organik maupun anorganik. Aplikasi proses elektrokoagulasi pertama kali dilakukan di United Kingdom pada tahun 1889. Elektrokoagulasi untuk pengolahan mineral telah dipatenkan oleh Elmore pada tahun 1904 dan elektrokoagulasi dengan Al dan Fe sebagai elektrodanya dipatenkan di USA in 1909 (Suhan dan Islam, 2022). Elektrokoagulasi merupakan pengolahan air limbah yang mudah dioperasikan dan ramah lingkungan dengan kemampuan penurunan beberapa polutan yang tinggi. Pengolahan ini mudah beradaptasi terhadap *loading rate* polutan dan debit yang berfluktuasi (Vicente dkk., 2023). Selain mudah dioperasikan, elektrokoagulasi mampu menghasilkan hasil air olahan yang jernih; menghasilkan lumpur yang stabil dan mudah dipisahkan; dapat menghilangkan partikel koloid yang berukuran sangat kecil dengan waktu yang cepat; tidak membutuhkan bahan kimia sehingga tidak dibutuhkan netralisasi yang dimungkinkan akibat kelebihan dosis bahan kimia; serta produksi gelembung gas selama proses pengolahan berpotensi membantu polutan terflotasi dan mudah dipisahkan (Masthura dan Jumiati, 2017).

Secara prinsip, dalam metode elektrokoagulasi terdapat kolom untuk meletakkan 2 jenis elektroda, dimana satu elektroda berfungsi sebagai anoda dan satu yang lain sebagai katoda. Kedua elektroda dihubungkan dengan *power supply* dan dimasukkan dalam air yang akan diolah atau yang disebut *elektrolyte* (Vicente dkk., 2023). Listrik dialirkan dari sumbernya (seperti *power supply*) ke dalam sel melalui elektroda yang dapat dibuat dari unsur yang sama atau berbeda, seperti Al-Al, Fe-Fe, Al-Fe, Fe-Al (Suhan dan Islam, 2022). Proses kompleks yang terdiri dari proses fisik dan kimia terjadi dalam elektrokoagulasi, dengan tahapan pembentukan ion pada elektroda, destabilisasi polutan, koagulasi dan flokulasi, flotasi dan sedimentasi, penurunan ion atau logam dan polutan pada permukaan katoda (Shahedi dkk., 2020). Penggunaan elektroda berbahan Al dengan fungsi sebagai anoda, koagulasi dalam elektrokoagulasi terjadi ketika anoda menghasilkan ion Al, yang bersifat koagulan aktif dalam mengikat polutan pada air limbah sehingga terbentuk flok (Alam dkk., 2022).

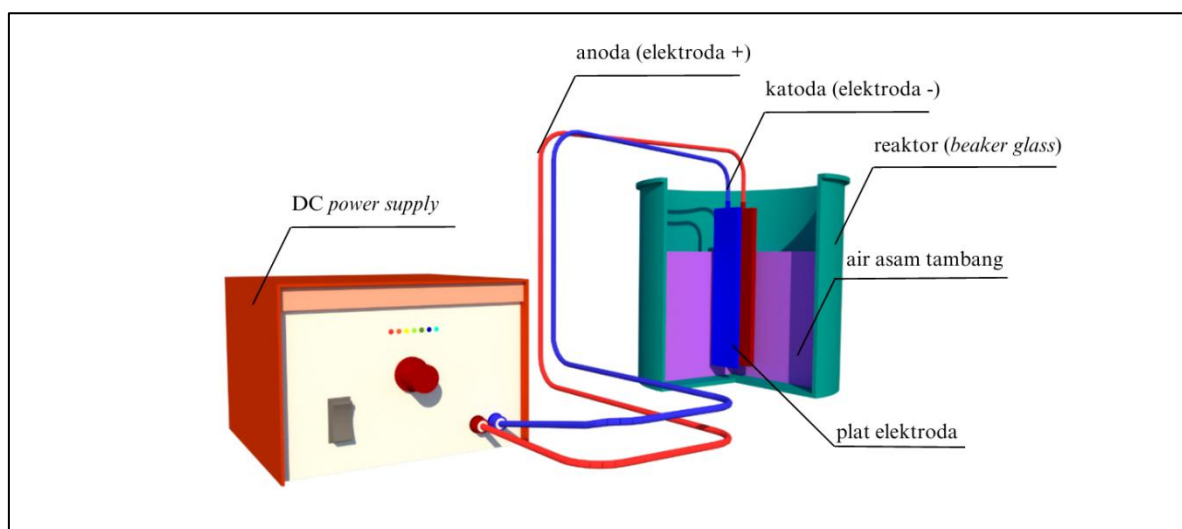
Kinerja pengolahan dengan elektrokoagulasi tergantung pada karakteristik air limbah, densitas arus listrik, pH, konduktivitas air limbah, elektroda (bahan, jumlah, ukuran, jarak antar elektroda, tebal), model aliran pada elektroda, waktu kontak, densitas gelembung, jenis *power supply*, voltase, dan kandungan asam (Al Aji dkk., 2012; Alam dkk., 2022; Suhan dan Islam, 2022; Vicente dkk., 2023). Proses elektrokoagulasi dipengaruhi oleh jenis pelat elektroda karena berhubungan dengan reaksi yang terjadi pada masing-masing elektroda (Asrifah dkk., 2021). Jenis elektroda yang umum digunakan adalah Al, Fe, baja ringan, dan *stainless steel*. Elektrokoagulasi dengan Al sebagai elektroda mudah diaplikasikan pada pengolahan air limbah dengan kemampuan yang baik dalam membentuk flok dari polutan yang terkandung di dalamnya. Kemampuan elektroda Al dan Fe pada proses elektrokoagulasi

memiliki kondisi optimum pengolahan yang bervariasi dan dipengaruhi oleh konsentrasi polutan, jenis polutan, pH dan laju pengadukan (Kabdasli dkk., 2012). Plat Al dan Fe sama-sama mampu menurunkan TSS lebih dari 85% (Al-Hanif dan Bagastyo, 2021). Waktu kontak juga mempengaruhi kinerja pengolahan, dimana dengan penggunaan waktu kontak yang lebih lama, penurunan TSS menjadi lebih baik (Al-Hanif dan Bagastyo, 2021; Asrifah, 2020). Kemampuan elektrokoagulasi telah terbukti dapat menetralkan pH awal 2,83 dan menurunkan TSS menjadi 9,5 mg/L dari konsentrasi awal 131,04 mg/L (Alam dkk., 2022). Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu menurunkan TSS sebesar 74,6% (Asrifah, 2020); penurunan mencapai 80% (Al-Shannag dkk., 2012); dan penurunan 90% (Al-Hanif dan Bagastyo, 2021).

Mengacu pada kemampuan elektrokoagulasi dalam mengolah AAT dan pengaruh dari beberapa faktor terhadap proses elektrokoagulasi, maka penelitian ini menguji pengaruh jenis plat dan waktu kontak terhadap kemampuan elektrokoagulasi dalam menetralkan pH dan menurunkan TSS pada AAT.

2. METODE

Penelitian diawali dengan persiapan penentuan lokasi pengambilan air limbah. Air limbah berupa AAT diperoleh dari perusahaan tambang batu bara di kawasan Kecamatan Tenggarong, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Perusahaan telah mengolah AAT dengan metode koagulasi kimia yang menghasilkan lumpur dalam jumlah besar. Pengambilan sampel AAT diambil di inlet *settling pond* guna menguji kemampuan elektrokoagulasi dengan fokus pengaruh variabel jenis pasangan elektroda dan waktu kontak dalam mengolah AAT. Pengambilan dilakukan secara *grab sampling* untuk proses pengujian karakteristik awal dan proses *running*, sebanyak ± 15 L.



Gambar 1. Kolom Elektrokoagulasi

Kolom elektrokoagulasi dipersiapkan, yang terdiri dari DC Power Supply Wanptek, penjepit tabung, *beaker glass* 600 mL, kabel penghantar listrik, serta plat elektroda Al dan Fe yang berukuran 10 x 2,5 cm. Reaktor yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1. Di dalam reaktor, digunakan jarak antar plat sebesar 1 cm; voltase 20 V; air asam tambang 500 mL; plat elektroda yang digunakan adalah pasangan Al-Al dan Al-Fe; waktu kontak 45, 90, 120, 150, dan 180 menit. Proses *running* dilakukan secara *batch* dan bertahap pada 10 perlakuan

yang menghasilkan 10 sampel guna mengetahui pengaruh jenis plat dan waktu kontak. *Running* dilakukan sebanyak dua kali percobaan. Rincian rancangan acak lengkap dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan Acak Lengkap Penelitian

Variasi Plat	Waktu Kontak (menit)					
	0	45	90	120	150	180
Al-Al	Sampel Awal	Sampel A	Sampel B	Sampel C	Sampel D	Sampel E
Al-Fe	Sampel Awal	Sampel F	Sampel G	Sampel H	Sampel I	Sampel J

Kinerja elektrokoagulasi dikaji dengan membandingkan konsentrasi awal dan akhir setelah proses pengolahan pada parameter pH dan TSS. Pengujian pH menggunakan metode potensiometri dengan menggunakan alat pH meter AMTAST-KL-016, sedangkan pengujian TSS menggunakan metode gravimetri, yang menggunakan *vacuum pump, oven* Memmert UN 55, neraca analitik Denver TP-214, serta desikator. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh jenis plat dan waktu kontak pada kinerja elektrokoagulasi dalam mengolah AAT, serta perbandingan hasil pengolahan AAT terhadap regulasi mengenai baku mutu air limbah kegiatan pertambangan yang terdapat dalam Peraturan Daerah Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.

Mengacu pada SNI 6989.3:2019 tentang cara uji padatan tersuspensi total (*Total Suspended Solids*, TSS) secara gravimetri, untuk perhitungan nilai TSS yang diperoleh melalui pengujian dengan metode gravimetri, dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 1:

$$mg\ TSS\ per\ liter = \frac{(W_1 - W_0) \times 100}{V} \quad (1)$$

dimana W_0 merupakan massa media penimbang ditambah dengan media penyaring awal (mg), W_1 merupakan massa media penimbang yang berisikan media penyaring serta residu kering (mg), dan V merupakan volume sampel (mL) (BSN, 2019).

Adapun untuk perhitungan efisiensi penyisihan parameter TSS dari AAT, dapat digunakan persamaan 2.

$$\% \text{ penyisihan} = \frac{C_{TSS\ awal} - C_{TSS\ akhir}}{C_{TSS\ awal}} \quad (2)$$

dimana $C_{TSS\ awal}$ ialah konsentrasi TSS awal sebelum pengolahan dilakukan (mg/L) dan $C_{TSS\ akhir}$ ialah konsentrasi TSS akhir setelah pengolahan dilakukan (mg/L).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Awal AAT

AAT yang digunakan untuk pengolahan dengan metode elektrokoagulasi dalam penelitian ini berasal dari PT. X, yang berlokasi di wilayah Desa Batuah, Kecamatan Loa Janan, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Air sampel yang digunakan untuk melakukan uji karakteristik awal AAT yaitu pada *inlet* salah satu *settling pond* pada PT.X. Parameter

kualitas AAT yang diukur meliputi pH dan *Total Suspended Solid* (TSS). Melalui hasil analisa AAT PT. X didapatkan hasil analisa yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2, dapat diketahui bahwa pada sampel AAT PT. X, untuk parameter pH dan *Total Suspended Solid* (TSS), melebihi baku mutu air limbah untuk kegiatan pertambangan batu bara berdasarkan Peraturan Daerah Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Nilai pH yang memenuhi standar baku mutu adalah 6–9 sementara nilai pH yang terdapat pada sampel limbah cair batu bara berada pada nilai 5,17, yang menunjukkan bahwa AAT di PT. X bersifat asam. Kadar *Total Suspended Solid* (TSS) yang diperbolehkan pada baku mutu adalah kurang dari 300 mg/L, sedangkan kadar *Total Suspended Solid* (TSS) pada sampel AAT batu bara cukup tinggi yaitu 582 mg/L, Mengacu pada subbab yang telah dipaparkan sebelumnya bahwa kondisi pH rendah (<6) pada AAT merupakan dampak dari dibukanya potensi keasaman batuan, sedangkan konsentrasi TSS yang tinggi diakibatkan dari tanah yang tererosi dari air limpasan akibat pembukaan lahan tambang (Fahrudin, 2018).

Tabel 2. Hasil Analisis Karakteristik Awal Sampel AAT PT. X

No.	Parameter	Satuan	Nilai Hasil Uji	Baku Mutu (Perda Kaltim No. 2/2011)
1	pH	-	5,17	6-9
2	<i>Total Suspended Solid</i> (TSS)	mg/L	582	300

3.2 Hasil Penelitian

Pengolahan ATT dengan metode elektrokoagulasi merupakan pengolahan alternatif terhadap AAT untuk mencegah pencemaran dan penurunan kualitas lingkungan. Pengolahan menggunakan metode elektrokoagulasi tepat digunakan karena flokulan yang dihasilkan dari AAT tidak memerlukan adanya penambahan koagulan berbahan kimia dari luar seperti kapur dan tawas, sehingga meminimalisir potensi pencemaran tanah dari ceceran bahan kimia dibandingkan menggunakan kapur dan tawas sebagai koagulan (Hidayah dkk., 2020). Berdasarkan uraian tersebut, dalam penelitian ini dilakukan pengolahan AAT dengan menggunakan metode elektrokoagulasi untuk mengetahui pengaruh dalam aplikasinya terhadap perubahan parameter pH dan TSS.

Berdasarkan pemaparan yang telah dijelaskan pada Tabel 2, dalam penelitian ini terdapat 2 (dua) variabel independen yang diuji pengaruhnya terhadap efektivitas pengolahan AAT menggunakan metode elektrokoagulasi, yakni jenis pasangan plat elektroda dan waktu kontak. Jenis plat yang digunakan ialah pasangan plat Al-Al dan Al-Fe, adapun untuk variabel waktu kontak menggunakan periode waktu 0, 45, 90, 120, 150, dan 180 menit. Sebanyak 2 (dua) kali pengulangan percobaan juga dilakukan dalam penelitian ini.

3.2.1 Analisis Parameter pH

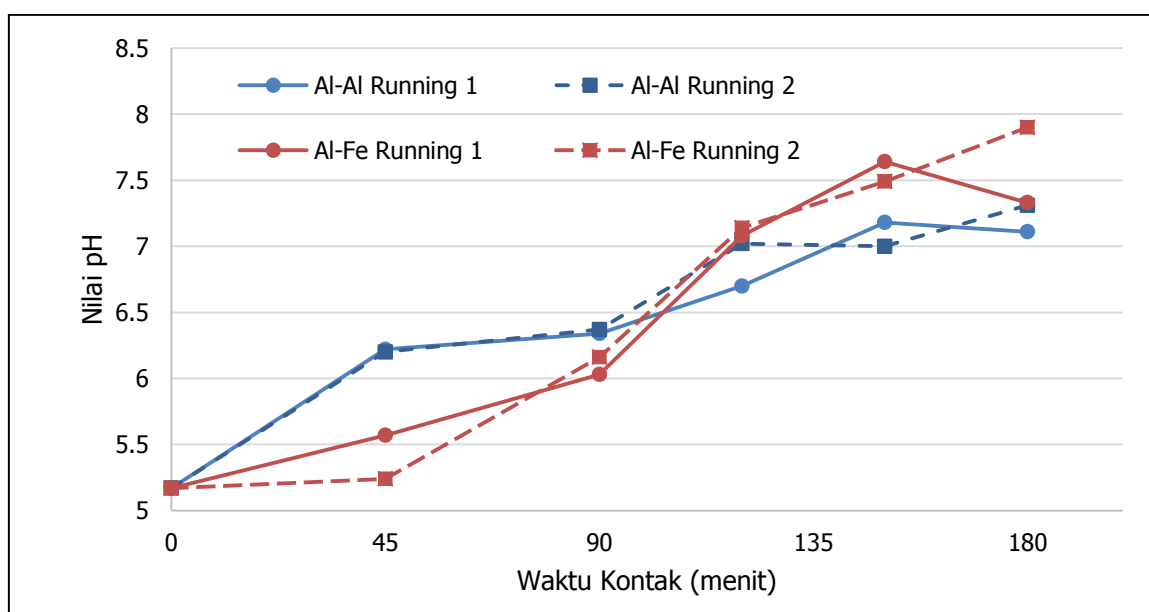
Parameter pH menunjukkan derajat tingkat keasaman atau kadar alkali dalam suatu larutan (Astria dkk., 2014). Nilai parameter ini digunakan untuk menentukan kebutuhan pengolahan pendahuluan dalam pengolahan air limbah guna menghindari gangguan pengolahan atau menunjang optimalisasi pengolahan (Ramadani dkk., 2021). Nilai pH dalam penelitian ini dianalisis pada masing-masing sampel AAT yang diberikan perlakuan berupa variasi jenis pasangan plat elektroda dan waktu kontak untuk mengetahui perubahan yang terjadi dalam pengolahan. Hasil nilai perubahan pH pada masing-masing perlakuan dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3. Hasil Analisis Parameter pH

Pengaruh Waktu Kontak dan Jenis Pasangan Elektroda dalam Proses Elektrokoagulasi Terhadap pH dan TSS Air Asam Tambang

Variasi Plat	Pengulangan	Nilai pH					
		0 menit	45 menit	90 menit	120 menit	150 menit	180 menit
Al-Al	I	5,17	6,22	6,34	6,70	7,18	7,11
	II	5,17	6,20	6,37	7,02	7,00	7,31
Al-Fe	I	5,17	5,57	6,03	7,08	7,64	7,33
	II	5,17	5,24	6,16	7,14	7,49	7,90

Berdasarkan Gambar 2, dapat dilihat bahwa terjadi perubahan nilai pH pada pengolahan AAT dengan elektrokoagulasi, dimana dalam kurun waktu 180 menit atau 3 jam terjadi perubahan nilai pH AAT dari kondisi awal dengan sebesar 5,17 mengalami kenaikan menuju kondisi pH netral, yakni pada kisaran 7,11-7,90. Hal ini berlaku untuk semua variasi pasangan plat yang digunakan dalam proses elektrokoagulasi, yakni variasi plat Al-Al dan plat Al-Fe. Adapun rata-rata nilai pH berubah pada masing-masing variasi pasangan plat Al-Al sebesar $6,75 \pm 0,4$ dan Al-Fe sebesar $6,76 \pm 0,87$. Kemudian, apabila nilai pH akhir dari pengolahan AAT dengan elektrokoagulasi tersebut (waktu kontak 180 menit) dibandingkan dengan baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batu bara berdasarkan Peraturan Daerah Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, nilai pH tersebut memenuhi rentang nilai pH yang dipersyaratkan oleh baku mutu yakni pada rentang 6-9.



Gambar 2. Perubahan Nilai pH dalam Proses Elektrokoagulasi Air Asam Tambang

Terdapat perbedaan pada kemampuan atau kecepatan perubahan pH dari kondisi awal jika melihat tren pH pada kedua variasi plat tersebut. Berkaca pada Gambar 2, variasi plat Al-Al maupun Al-Fe, nilai pH meningkat seiring bertambahnya waktu kontak pengolahan hingga pada waktu tertentu sebelum terjadinya penurunan yang lambat, tren fluktuatif yang relatif kecil, ataupun terus meningkat secara perlahan. Melalui dua kali *running* proses elektrokoagulasi dengan variasi plat Al-Al, perubahan pH cukup tinggi pada waktu kontak 45 menit dan terus meningkat secara perlahan hingga 120 menit, kemudian ada tren meningkat di menit ke-150 dan menurun sedikit pada menit ke-180 (*running* 1), dan ada yang mengalami sedikit penurunan dan kembali meningkat (*running* 2). Berbeda dengan plat Al-Fe, pada dua kali *running*, terjadi perubahan pH yang cukup tinggi mulai terlihat pada waktu kontak 120 menit dan terus meningkat secara perlahan hingga 150 menit, kemudian ada

yang mengalami penurunan (*running 1*) dan ada yang terus meningkat (*running 2*). Jika dibandingkan antara kemampuan plat Al-Al dan Al-Fe (Gambar 2), plat Al memiliki kecepatan perubahan pH yang lebih tinggi dibandingkan plat Al-Fe. Hal ini dikarenakan Al mudah larut pada kondisi asam, sedangkan Fe mudah larut pada kondisi basa (Prayitno dkk., 2018).

Meningkatnya nilai pH pada AAT yang diolah dengan metode elektrokoagulasi dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Terjadinya perubahan pH ini dikarenakan oleh akumulasi dari ion hidroksida (OH^-) yang meningkat dalam proses elektrokoagulasi (Fendriani dkk., 2020). Kondisi ini memicu terbentuknya gelembung gas yang semakin banyak sebagai akibat dari semakin rendahnya kebutuhan energi untuk pembentukan gas hidrogen atau oksigen. Ketika nilai pH awal air limbah telah mencapai nilai netral dalam proses koagulasi, maka perubahan pH akan meningkat secara perlahan. Hal ini menunjukkan kelebihan elektrokoagulasi dibandingkan koagulasi secara kimiawi. Proses elektrokoagulasi dapat menjaga keseimbangan antara produksi dan konsumsi ion hidroksil untuk kebutuhan netralisasi sebelum perubahan akhir senyawa aluminium terlarut menjadi aluminium hidroksida (Kabdasli dkk., 2012).

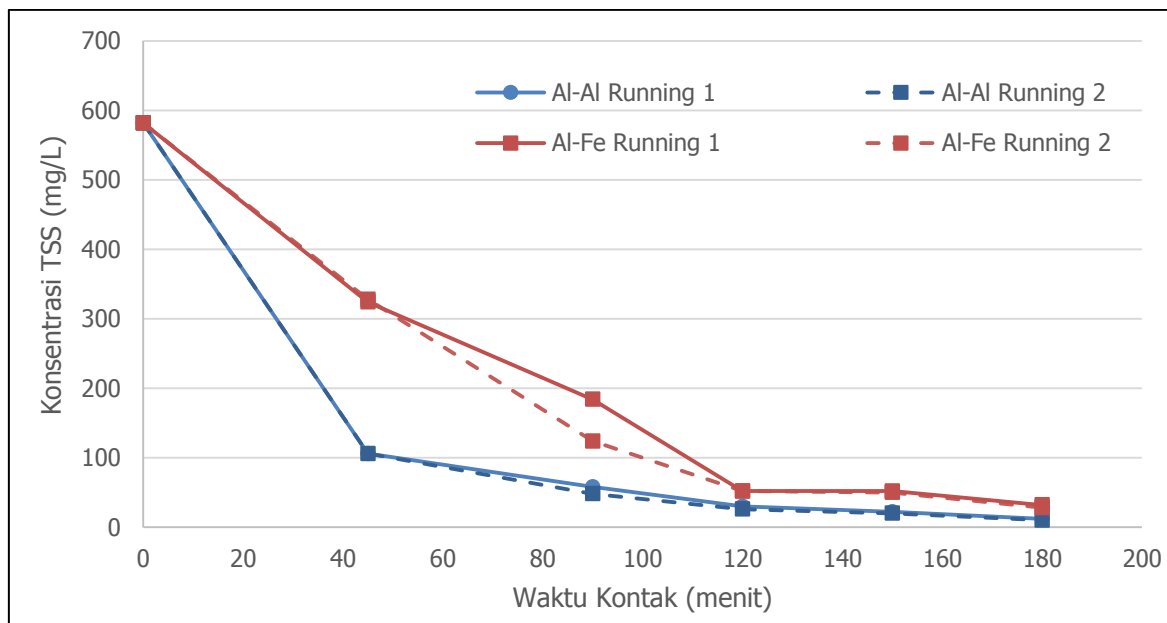
Adapun variasi tren yang terjadi selama proses elektrokoagulasi setelah 120 menit pada jenis plat Al-Al disebabkan oleh terjadinya pasivitas plat. Pasivitas plat yaitu kondisi telah terjadinya kejenuhan plat akibat banyaknya jumlah flok yang terbentuk pada permukaan plat. Kondisi ini berpotensi menghambat terbentuknya ion logam pada anoda, yaitu Al^{3+} dan ion OH^- pada katoda. Hal ini menyebabkan koagulan yang terbentuk semakin kecil. Namun penurunan masih tetap terjadi, karena flok yang telah terbentuk akan saling bertumbukan yang menyebabkan berat jenis flok meningkat dan pada akhirnya mengendap pada dasar reaktor. Pengendapan flok ini mengakibatkan permukaan plat tidak tertutupi lagi oleh flok dan telah aktif kembali (Prayitno dkk., 2018).

3.2.2 Analisis Parameter TSS

Selain nilai pH, dilakukan juga analisis terhadap parameter Total Suspended Solid (TSS). TSS merupakan padatan tidak terlarut namun tidak dapat langsung mengendap, yang menyebabkan kekeruhan air (Sukmono, 2018). Hasil analisis TSS pada AAT yang diolah menggunakan proses elektrokoagulasi, dimana masing-masing sampel AAT diberikan perlakuan berupa variasi jenis pasangan plat elektroda dan waktu kontak dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 3.

Tabel 4. Hasil Analisis Parameter TSS

Variasi Plat	Waktu (menit)	Running I		Running II	
		Konsentrasi (mg/L)	Efisiensi Penyisihan (%)	Konsentrasi (mg/L)	Efisiensi Penyisihan (%)
Al-Al	0	582	-	582	-
	45	106	82	106	82
	90	58	90	48	92
	120	30	95	26	96
	150	22	96	20	97
	180	12	98	10	98
Al-Fe	0	582	-	582	-
	45	324	44	328	44
	90	184	68	124	79
	120	52	91	52	91
	150	52	91	50	91
	180	32	95	28	95



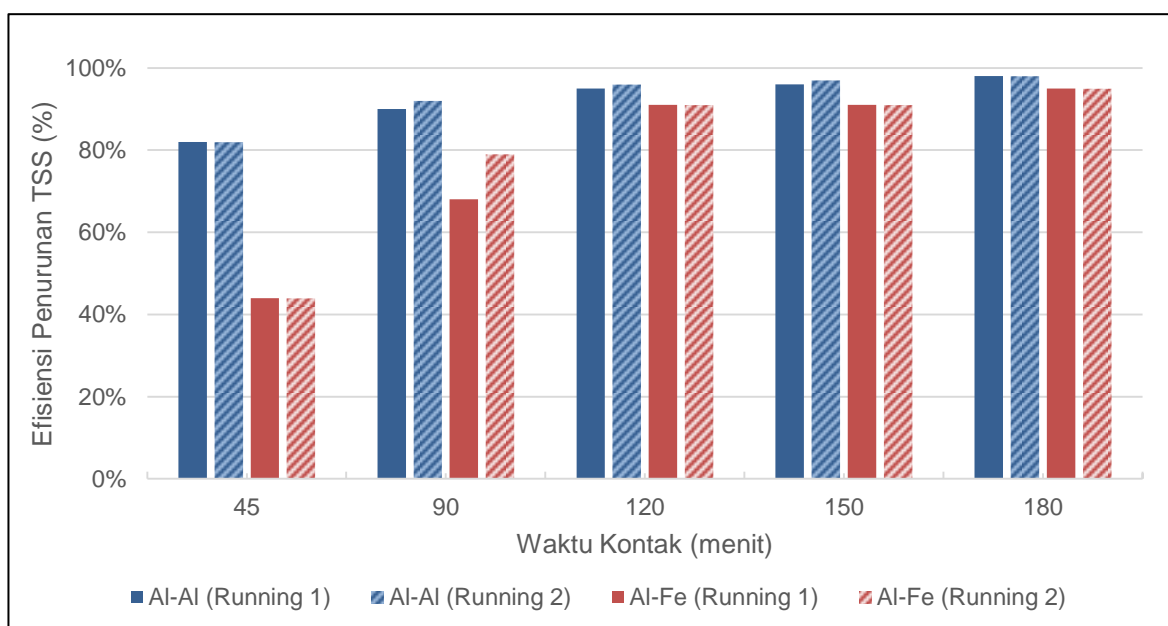
Gambar 3. Perubahan Nilai TSS dalam Proses Elektrokoagulasi Air Asam Tambang

Gambar 3 menunjukkan bahwa terjadi perubahan nilai TSS pada pengolahan AAT dengan elektrokoagulasi, dimana dalam kurun waktu 180 menit atau 3 jam terjadi perubahan nilai TSS air asam tambang dari kondisi awal dengan sebesar 582 mg/L mengalami penurunan yakni pada kisaran 10-32 mg/L. Hal ini berlaku untuk semua variasi pasangan plat yang digunakan dalam proses elektrokoagulasi, yakni variasi plat Al-Al dan plat Al-Fe. Adapun rata-rata nilai TSS berubah menjadi $43,8 \pm 34,06$ mg/L pada variasi plat Al-Al dan menjadi $122,6 \pm 110,49$ mg/L pada variasi plat Al-Fe. Kemudian, apabila nilai TSS akhir dari pengolahan AAT dengan elektrokoagulasi tersebut (waktu kontak 180 menit) dibandingkan dengan baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batu bara berdasarkan Peraturan Daerah Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, nilai TSS tersebut memenuhi baku mutu, dimana untuk konsentrasi maksimum yang dipersyaratkan untuk parameter TSS ialah 300 mg/L.

Terjadinya penyisihan TSS ini dikarenakan oleh reaksi pada anoda dan katoda selama proses elektrokoagulasi berlangsung, di mana anoda mengalami oksidasi pada anion atau ion negatif yang membentuk ion Al^{3+} , sedangkan pada katoda mengalami reduksi pada kation atau ion positif membentuk ion OH^- atau gas hidrogen. Kedua ion yang dihasilkan ini membentuk $Al(OH)_3$ sebagai koagulan yang berfungsi sebagai destabilisator partikel koloid yang terkandung dalam air sehingga terbentuk flok. Partikel flok akan menuju ke atas permukaan oleh OH^- atau dapat juga mengendap ke dasar bak karena adanya perubahan ukuran dan massa flok (Ni'am dkk., 2017). TSS adalah polutan dalam bentuk tersuspensi dan pada umumnya berbentuk solid dengan ukuran tertentu. Jenis partikel seperti ini memiliki sifat mudah diadsorpsi oleh koagulan $Al(OH)_3$ yang berpotensi mengalami pengendapan atau diadsorpsi oleh gelembung udara yang berpotensi mengalami flotasi, sehingga konsentrasi TSS dapat menurun di dalam air limbah (Saputra, 2018).

Secara umum yang terlihat pada hasil penelitian (Gambar 3) membuktikan bahwa waktu kontak memberikan efek terhadap hasil pengolahan, dimana semakin lama waktu kontak memberikan hasil pengolahan yang semakin baik. Hal ini dipengaruhi karena semakin lama pengolahan maka koagulan yang terbentuk juga semakin besar, sehingga akan semakin

banyak partikel yang dapat diikat membentuk partikel flok (Ramadhan dkk., 2021). Berkaca pada Gambar 3, terdapat perbedaan pada kemampuan atau kecepatan penurunan TSS dari kondisi awal jika dilihat lebih mendalam pada tren konsentrasi TSS pada kedua variasi plat tersebut, dimana untuk variasi plat Al-Al maupun Al-Fe, nilai TSS menurun seiring bertambahnya waktu kontak pengolahan dari awal hingga menit ke-180. Pada dua kali *running* proses elektrokoagulasi dengan variasi plat Al-Al, perubahan parameter TSS terbilang tinggi pada waktu kontak 45 menit dan terus menurun dengan perlahan hingga 180 menit. Berbeda dengan plat Al-Fe, pada dua kali *running*, penurunan nilai TSS cukup tinggi hingga menit ke-120, kemudian terjadi penurunan yang pelan hingga menit ke-180. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu proses elektrokoagulasi maka parameter TSS pada limbah cair juga semakin menurun (Ramadhan dkk., 2021).



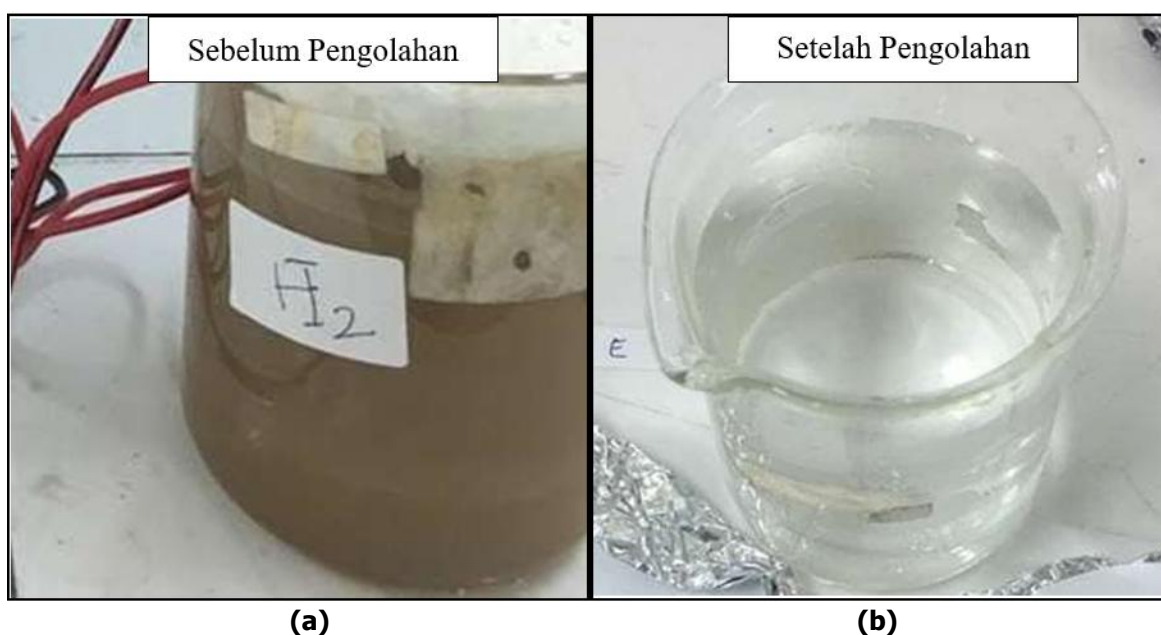
Gambar 4. Efisiensi Penurunan TSS dalam Proses Elektrokoagulasi Air Asam Tambang

Tidak hanya perbedaan tren penurunan nilai TSS, penggunaan variasi plat yang berbeda juga menghasilkan nilai efisiensi penyisihan TSS yang berbeda pula. Mengacu pada Tabel 3 dan Gambar 4, efisiensi penyisihan TSS dengan variasi plat Al-Al tertinggi terjadi pada menit ke-180 dengan penurunan sebesar 98%. Adapun efisiensi penyisihan tertinggi dengan variasi plat Al-Fe terjadi pada menit ke-180 dengan sebesar 95%, sehingga variasi plat Al-Al memberikan hasil efisiensi penyisihan yang lebih baik dibandingkan variasi plat Al-Fe. Variasi plat yang digunakan sebagai anoda, yaitu Al dan Fe memiliki kemampuan yang berbeda dalam penurunan TSS dikarenakan plat Al lebih mudah teroksidasi dibandingkan plat Fe, sehingga mudah membentuk koagulan Al(OH)_3 dan polimer hidroksil kompleks (Ashari dkk., 2015). Hal ini juga terlihat pada kolom elektrokoagulasi yang dilakukan, dimana plat Al-Al menghasilkan lebih banyak flok dibandingkan plat Al-Fe.

3.2.3 Perbandingan Visual Limbah AAT antara Sebelum dengan Sesudah Pengolahan

Perubahan yang terjadi terhadap sampel AAT yang diambil dari PT. X tidak hanya pada parameter pH dan TSS saja, tetapi juga terhadap tampilan atau visual dari AAT tersebut. Kondisi sampel ATT pada kondisi sebelum dan sesudah pengolahan dapat diamati pada Gambar 5.

Berkaca pada Gambar 5a, terlihat bahwa pada untuk kondisi awal dari sampel AAT, air berwarna coklat pekat, dimana hal ini menunjukkan bahwa pada sampel AAT ini mengandung konsentrasi padatan tersuspensi (TSS) yang tinggi, seperti yang telah dipaparkan pada Tabel 2. Adapun untuk keadaan sampel AAT sesudah mengalami pengolahan, dapat terlihat pada Gambar 5b bahwa air menjadi lebih jernih (tidak berwarna) dan terdapat sedikit endapan padatan yang terdapat di bagian bawah *beaker glass*. Kondisi yang dilihat secara fisik ini sejalan dengan keuntungan dari teknologi elektrokoagulasi, yaitu dapat menghasilkan air yang jernih karena menghasilkan lumpur yang stabil dan mudah dipisahkan (Masthura dan Jumiati, 2017).



Gambar 5. Perubahan Tampilan Sampel AAT untuk Kondisi: (a) Sebelum dan (b) Sesudah

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variabel jenis plat beserta waktu kontak mempengaruhi efektivitas pengolahan limbah AAT dengan menggunakan metode elektrokoagulasi, yang ditinjau pada parameter pH dan TSS untuk keadaan sebelum dengan sesudah pengolahan. Untuk pengaruh variasi jenis plat, baik variasi plat Al-Al maupun Al-Fe mampu menaikkan nilai pH dari keadaan asam menuju kondisi netral, serta mampu menyisihkan parameter TSS dengan sebesar 98% untuk variasi plat Al-Al dan sebesar 95% untuk plat Al-Fe. Pengaruh waktu kontak terhadap perubahan nilai pH, dari waktu awal hingga menit ke-120 memiliki tren meningkat, dan setelah itu terjadi tren fluktuatif yang tidak terlalu berubah signifikan hingga menit ke-180. Adapun pengaruh waktu kontak terhadap parameter TSS, tren nilai TSS cenderung menurun seiring berjalannya waktu dengan cukup cepat hingga menit ke-120, dan selanjutnya hingga menit ke-180, penurunan nilai TSS cenderung melambat. Memperhatikan hasil penelitian ini, penelitian selanjutnya dapat menggunakan waktu yang lebih singkat untuk proses yang lebih efisien guna aplikasi teknologi elektrokoagulasi.

PERSANTUNAN

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknik Universitas Mulawarman karena telah memberikan dukungan finansial dalam menunjang kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Aji, B., Yavuz, Y., & Koparal, A. S. (2012). Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. *Separation and Purification Technology*, 86, 248–254.
- Alam, P. N., Yulianis, Pasya, H. L., Aditya, R., Aslam, I. N., & Pontas, K. (2022). Acid mine wastewater treatment using electrocoagulation method. *Materials Today: Proceedings*, 63(1), S434–S437.
- Al-Hanif, E. T., & Bagastyo, A. Y. (2021). Electrocoagulation for drinking water treatment: A review. 623, 012016.
- Al-Shannag, M., Lafi, W., Bani-Melhem, K., Gharagheer, F., & Dhaimat. (2012). Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electro-coagulation and chemical coagulation. *Separation Science and Technology*, 47(5), 700–708.
- Anshariah, Widodo, S., & Nuhung, R. (2015). Studi pengelolaan air asam tambang pada PT. Rimau Energy Mining Kabupaten Barito Timur Provinsi Kalimantan Tengah. *Jurnal Geomine*, 01, 46–54.
- Ashari, Budianta, Dedik, & Setiabudidaya, D. (2015). Efektivitas elektroda pada proses elektrokoagulasi untuk pengolahan air asam tambang. *Jurnal Penelitian Sains*, 17(2), 45–50.
- Asrifah, R. D., Anastasia, T. T., & Aurilia, M. F. (2021). Effect of time and voltage on pollutant remover in gold treatment wastewater with electrocoagulation batch reactor. *Lkawnie: Journal of Islamic Science and Technology*, 7(1), 172–181.
- Asrifah, R. D. (2020). TSS, Cu, and Hg removal with electrocoagulation method for gold mine wastewater. *AIP Conference Proceedings*, 2245, 030012.
- Astria, F., Subito, & Nugraha, D. W. (2014). Rancang bangun alat ukur pH dan suhu berbasis short message service (SMS) gateway. *Jurnal Mektrik*, 1(1), 47–55.
- BSN. (2019). SNI 6989.3-2019 Air dan air limbah – Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (total suspended solids, TSS) secara gravimetri.
- Fahrudin. (2018). *Pengelolaan limbah pertambangan secara biologis*, Makassar. Celebis Media Perkasa.
- Fatmawati, Budiman, & Dyastari, L. (2018). Dampak lingkungan galian tambang batubara PT. Kaltim Prima Coal bagi kesehatan masyarakat di Kecamatan Sangatta Utara Kabupaten Kutai Timur. *eJournal Ilmu Pemerintahan*, 6(2), 553–566.
- Fendriani, Y., Nurhidayah, Handayani, L., Rustan, Samsidar, & Peslinof, M. (2020). Pengaruh variasi jarak elektroda dan waktu terhadap pH dan TDS limbah cair batik menggunakan metode elektrokoagulasi. *Journal Online of Physics*, 5(2), 59–64.
- Hidayah, R. A., Sutoyo, H. D., Dzakiya, N., & Saputra, Y. A. (2020). Pengolahan air asam tambang di penambangan mineral logam Kabupaten Pacitan Provinsi Jatim dengan metoda elektrokoagulasi. *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 1(1), 13–18.
- Hidayat, L. (2017). Hidayat, L. (2017). Pengelolaan lingkungan areal tambang batubara (studi kasus pengelolaan air asam tambang (acid mining drainage) di PT. Bhumi Rantau Energi Kabupaten Tapin Kalimantan Selatan). *Jurnal ADHUM*, 7(1), 44–52. *Jurnal ADHUM*, 7(1), 44–52.

- Kabdasli, I., Arslan-Alaton, I., Olmez-Hanci, T., & Tunay, O. (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewater: A critical review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 2–45.
- Kaharapenni, M., & Noor, R. H. (2015). Pencemaran kualitas air dari adanya potensi air asam tambang akibat penambangan batubara (studi kasus pada Sungai Patangkep). *Jurnal Intekna*, 15(2), 156–160.
- Masthura, M., & Jumiaty, E. (2017). Quality improvement of water using electrocoagulation and carbon filter methods. *Fisitek: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, 1(2).
- Ni'am, A. C., Caroline, J., & Afandi, M. H. (2017). Variasi jumlah elektroda dan besar tegangan dalam menurunkan kandungan COD dan TSS limbah cair tekstil dengan metode elektrokoagulasi. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(1), 21–26.
- Oncel, M. S., Munchu, A., Demirbas, E., & Kobya, M. (2013). A comparative study of chemical precipitation and electrocoagulation for treatment of coal acid drainage wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 989–995.
- Prayitno, Ridantami, V., & Mulyani, I. M. (2018). Pengaruh pH terhadap penurunan konsentrasi thorium dalam limbah menggunakan proses elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium dan tembaga. *Urania*, 24(3), 135–198.
- Ramadani, R., Samsunar, S., & Utami, M. (2021). Analisis suhu, derajat keasaman (pH), chemical oxygen demand (COD), dan biological oxygen demand (BOD) dalam air limbah domestik di Dinas Lingkungan Hidup Sukoharjo. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 6(2), 12–22.
- Ramadhan, A. F., Amri, I., & Drastinawati. (2021). Pengaruh jarak elektroda dan kuat arus pada pengolahan air gambut dengan proses elektrokoagulasi secara kontinu. *Journal of Bioprocess Chemical and Environmental Engineering Science*, 2(1), 46–55.
- Said, N. I. (2014). Teknologi pengolahan air asam tambang batubara "alternatif pemilihan teknologi." *Jurnal Air Indonesia*, 7(2).
- Saputra, A. I. (2018). Penurunan TSS air limbah laboratorium rumah sakit menggunakan metode elektrokoagulasi. *Journal of Nursing and Public Health*, 6(2), 6–13.
- Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22, 154–169.
- Suhan, Md. B. K., & Islam, Md. S. (2022). Recent advances and perspective of electrocoagulation in the treatment of wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 17(2–3), 100643.
- Sukmono, A. (2018). Pemantauan total suspended solid (TSS) Waduk Gajah Mungkur periode 2013-2017 dengan citra satelit Landsat-8. *Jurnal Geodesi Dan Geomatika*, 1(1), 33–38.
- Tom, I. N., Adnyano, A. A. I. A., & Sumarjono, E. (2020). Kajian teknis pencegahan dan penanganan air asam tambang pada penambangan batubara PT. Kayan Putra Utama Coal-Site Separi. *Mining Insight*, 1(2), 203–210.
- Vicente, C., Silva, J. R., Santos, A. D., Silva, J. F., Mano, J. T., & Castro, L. M. (2023). Electrocoagulation treatment of furniture industry wastewater. *Chemosphere*, 328, 138500.
- Wahyudin, I., Widodo, S., & Nurwaskito, A. (2018). Analisis penanganan air asam tambang batubara. *Jurnal Geomine*, 6(2), 85–89.