

# PENGOLAHAN AIR ASAM TAMBANG DI LAHAN BEKAS PERTAMBANGAN EMAS TANPA IZIN (PETI) MANDOR SEBAGAI ELEKTROLIT *FUEL CELL*

Zuliah Anggraini<sup>1)</sup>, Septami Setiawati<sup>2)</sup> dan Yoga Herlambang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak

<sup>2)</sup>Dosen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak  
Email : zuliahanggraini@gmail.com

## ABSTRAK

Kerusakan lahan akibat Pertambangan Emas Tanpa Izin (PETI) Mandor berkisar  $\pm 1.000$  Ha. Lahan tersebut mengandung tailing dengan kadar sulfur yang tinggi sebagai potensial terbentuknya air asam tambang (AAT). Tujuan penelitian untuk menganalisis potensi AAT dan energi listrik, karakterisasi sampel, pengujian *fuel cell* serta perubahan pH dan konsentrasi Fe sebelum dan setelah pengujian *fuel cell*. Metode penelitian ini dilakukan dengan *Composite Sampling* disertai pengujian in-situ dan pengukuran kolam. Kemudian karakterisasi sampel AAT melalui uji AAS dan pH, sedangkan sampel batuan melalui uji XRD dan XRF. Sampel AAT diolah menggunakan rangkaian *fuel cell* dan lampu, serta diuji laboratorium kembali untuk menghitung perubahan pH dan konsentrasi Fe. Hasil pengukuran lapangan menunjukkan volume AAT sebanyak 22.400 liter memiliki pH 2,1 dan konsentrasi Fe sebesar 6,67 mg/liter. Menurut hasil uji XRD diketahui sampel batuan mengandung pirit, sedangkan hasil XRF terdeteksi beberapa unsur terbesar, seperti Fe, S, dan Mo. Berdasarkan pengujian *fuel cell*, semakin lama sel bekerja semakin kecil tegangan, kuat arus, dan nyala lampu. Semakin banyak jumlah sel dan lampu maka semakin besar tegangan, kuat arus, dan nyala lampu. Potensi energi listrik yaitu 0,25 Watt/liter. Penelitian ini menaikkan pH dengan efektivitas 48,78%, 52,27% dan 56,25%, serta menurunkan konsentrasi Fe dengan efektivitas 97,90%, 98,50% dan 99,40%.

**Key Words:** air asam tambang (AAT), elektrokoagulasi, *fuel cell*, PETI, sulfida

## ABSTRACT

Land damage due to the Unlicensed Gold Mining at the Mandor is around  $\pm 1,000$  Ha. The land contains tailings with high sulfur content as a potential for acid mine drainage (AMD). The research objectives were to analyze AMD potential and electrical energy, sample characterization, fuel cell testing and changes in pH and Fe concentration before and after fuel cell testing. This research method was carried out by Composite Sampling accompanied by in-situ testing and pond measurements. Then the characterization of AMD samples through AAS and pH tests, while rock samples through XRD and XRF tests. AAT samples were processed using a series of fuel cells and lamps, and were tested in the laboratory again to calculate changes in pH and Fe concentration. The results of field measurements showed that the volume of AAT as much as 22,400 liters had a pH of 2.1 and an Fe concentration of 6.67 mg/liter. According to XRD test results, it is known that rock samples contain pyrite, while XRF results detected some of the largest elements, such as Fe, S, and Mo. Based on the fuel cell test, the longer the cell works, the lower the voltage, current, and light. The more the number of cells and lamps, the greater the voltage, the stronger the current, and the flame. The potential for electrical energy is 0.25 Watt/liter. This study increased the pH with an effectiveness of 48.78%, 52.27% and 56.25%, and decreased the concentration of Fe with an effectiveness of 97.90%, 98.50% and 99.40%.

**Key Words:** acid mine drainage (AMD), electrocoagulation, fuel cell, illegal mining, sulfide

## I. PENDAHULUAN

Kasus Pertambangan Emas Tanpa Izin (PETI) di Mandor kerap ditertibkan, namun kini masih terus beraktivitas yang menandakan bahwa Mandor masih terdapat lahan yang aktif dilakukan penambangan emas ilegal. Menurut Dinas Lingkungan Hidup Kalimantan Barat, kerusakan lahan aktivitas PETI Cagar Alam Mandor Kabupaten Landak adalah  $\pm 1.000$  Ha. Lahan tersebut kini berubah menjadi padang pasir mengandung endapan tailing (Suhendra, 2021). Mineral dengan kandungan sulfur

yang tinggi dalam tailing sering menjadi satu sumber potensial terbentuknya air asam tambang (Pohan, 2007). Air asam tambang tersebut dapat mencemari Sungai Mandor yang merupakan sumber kehidupan sosial karena adanya pemukiman masyarakat di tepian sungai dengan budaya kehidupan masyarakatnya yang ketergantungan terhadap air sungai (Triana dkk, 2012).

Berdasarkan standar keberhasilan reklamasi menurut Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan

Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik, dalam hal terdapat potensi air asam tambang dan pelindian logam, pemegang Izin Usaha Pertambangan (IUP) dan Izin Usaha Pertambangan Khusus (IUPK) wajib melakukan kajian geokimia terhadap formasi geologi pembawa sifat asam dimulai sejak kegiatan eksplorasi. Adapun kajian geokimia yang dimaksud meliputi identifikasi potensi pembentukan air asam tambang, pencegahan dan penanggulangannya. Aspek pertambangan dari penelitian ini ialah mengidentifikasi potensi pembentukan air asam tambang dan penanggulangannya. Cara yang dapat dilakukan untuk mengidentifikasi potensi pembentukan air asam tambang ialah menganalisis hasil karakterisasi sampel air asam tambang maupun batuan sulfida melalui pengujian pH (Ashari, 2016), XRD, XRF, dan AAS (Kilian dkk, 2018). Sedangkan cara yang dapat dilakukan untuk penanggulangan air asam tambang ialah melalui pengujian *fuel cell* dengan menganalisis besaran daya hantar listrik, waktu maksimum dan tingkat nyala lampu, serta potensi daya hantar listrik yang dihasilkan dalam potensi pengembangan pengujian *fuel cell*.

Dari hasil uji XRD dan XRF akan dilihat unsur logam terlarut apa yang paling banyak dikandung mineral sulfida sebagai pembentukan air asam tambang. Kemudian melalui uji AAS akan diukur konsentrasi logam tersebut yang dijadikan sebagai parameter yang akan direduksi, sedangkan uji pH digunakan untuk mengukur derajat keasaman air asam tambang yang akan dikurangi kadar keasamannya. Keberhasilan penurunan konsentrasi logam dan kenaikan pH ini untuk efektivitas pengolahan atau penanggulangan air asam tambang melalui uji *fuel cell* sebagaimana Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

## II. METODOLOGI DAN PUSTAKA

Alat yang digunakan yakni, antara lain ialah pH universal, thermometer, GPS, meteran, kayu, APD, gayung bertangkai panjang, terpal, wadah plastik Polietilena, wadah HDPE, *beaker glass*, pH meter, mortar pestle, ayakan 120 Mesh, kabel buaya, multimeter, elektroda Al dan C, lampu pijar 3 V, tali, ATK, aluminium *foil*, bak penampung, asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ), *stopwatch*, kamera, *Microsoft Excel*, *Google Earth Pro*, *ArcGIS version 10.3*, serta *Match! version 3.3*. Sedangkan bahan dalam penelitian ini ialah sampel batuan dan air asam tambang yang diperoleh pada kolam/lubang bukaan yang tersingkap di lahan bekas PETI Mandor, serta akuades dan deterjen bebas fosfat.

### A. Penentuan Lokasi Pengambilan Sampel

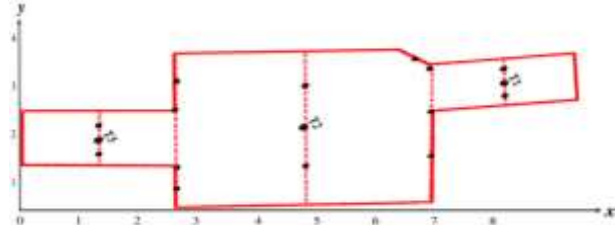
Penentuan lokasi pengambilan sampel dilakukan dengan membuat perencanaan dan melakukan

penjelajahan lokasi penelitian di lahan bekas PETI Mandor yang berada di Desa Mandor, Kecamatan Mandor, Kabupaten Landak. Adapun kesampaian lokasi tepat berada di jalan utama Desa Mandor secara geografis terletak pada koordinat  $0^{\circ}19'5,24''$  LU dan  $109^{\circ}20'26,74''$  BT. Penelitian dilakukan dengan menjelajahi lahan bekas PETI Mandor dengan luas 1.000 Ha.

Dalam mengidentifikasi adanya indikator kehadiran air asam tambang pada penelitian ini perlu dilakukan pengamatan secara langsung pada masing-masing kolam/lubang bukaan tersingkap di lahan bekas PETI Mandor yang bertujuan untuk mendapatkan informasi penyebab terbentuknya air asam tambang tersebut, dengan mengamati sekitar kolam yang menunjukkan terdapatnya batuan sulfida. Penentuan titik pengambilan sampel uji batuan ini dilakukan dengan *Systematic Random Sampling* pada tujuh titik dengan masing-masing jarak antar titik sebesar 3,5-4 m mengelilingi kolam pengambilan sampel air asam tambang (kolam A). Teknik pengambilan sampel uji batuan ini adalah metode *Grab and Composite Sampling* yang diambil pada tepi kolam dengan menggunakan *dipper* (gayung bertangkai panjang) sebagaimana SNI 8520:2018. Alasan penggunaan SNI tersebut karena sampel batuan pada penelitian ini merupakan sisa (tailing) dari aktivitas bekas PETI yang mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3). Menurut Lampiran IX Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup juga menyebutkan bahwa tailing masuk dalam limbah B3 Kategori 2. Limbah B3 Kategori 2 merupakan limbah yang mengandung B3 dengan efek tertunda (*delayed effect*) karena berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan hidup, serta memiliki toksisitas subkronis atau kronis. Oleh karena tailing sering menjadi satu sumber terbentuknya air asam tambang (Pohan, 2007)., sehingga sampel batuan yang diuji pada penelitian ini merupakan sumber potensial pembentukan air asam tambang yang diolah pada pengujian *fuel cell*.

Pengambilan sampel air asam tambang dilakukan pada tiga titik *sampling* kolam/lubang bukaan tersingkap di kolam terluas (kolam A) di lahan bekas PETI Mandor yang terindikasi memiliki derajat keasaman yang rendah. Pada masing-masing kolam A hingga I dan masing-masing titik *sampling* kolam A perlu dilakukan pengukuran kedalaman kolam berdasarkan titik ukur penampang melintang/basah, di mana setiap penampang diukur pada tiga hingga empat titik dengan jarak yang disesuaikan dengan panjang penampang dan/atau bentuk dasar kolam. Hasil ukur ini bertujuan untuk menghitung luas penampang kolam. Pengukuran kedalaman kolam dilakukan menggunakan meteran dengan bantuan kayu. Selain itu juga mengukur luas permukaan

kolam menggunakan meteran dengan bantuan GPS untuk menyesuaikan bentuk permukaan kolam. Melalui data luas penampang dan jarak antar penampang semua kolam, maka didapatkan total volume kolam secara keseluruhan untuk menghitung volume air asam tambang yang berpotensi dimanfaatkan sebagai elektrolit *fuel cell*. Sketsa pengambilan sampel air asam tambang dapat dilihat pada Gambar 1.



Keterangan :

- ● T1 = Titik sampling 1;
- ● T2 = Titik sampling 2;
- ● T3 = Titik sampling 3;
- ● = Titik ukur penampang;
- □ = Tampak atas kolam A;
- - - - - = Penampang melintang/basah;
- x = Lebar kolam (meter); dan
- y = Panjang kolam (meter).

Gambar 1. Sketsa pengambilan sampel air asam tambang (Sumber : Hasil Rancangan)

Adapun teknik pengambilan sampel uji air asam tambang pada penelitian ini menggunakan metode *Composite Sampling* yaitu mengambil sampel uji dari beberapa titik pada satu lokasi dengan waktu yang berbeda dan volume yang sama. Teknik pengambilan sampel air asam tambang dengan cara *Composite Sampling* ini mengacu pada SNI 8990:2021 di mana titik pengambilan sampel ditentukan secara proporsional. Hal ini ditujukan untuk kegiatan yang belum memiliki Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dan limbah belum masuk (tercemar) ke badan air penerima. Berdasarkan SNI 6989.57:2008 tentang Metode Pengambilan Contoh Air Permukaan, danau atau waduk yang kedalamannya kurang dari 10 m maka contoh (sampel) diambil di dua titik yaitu permukaan dan bagian dasar, kemudian dicampurkan (*composite* kedalaman). Mengacu pada kedua SNI tersebut, penentuan titik *sampling* pada penelitian ini dilakukan dengan mengikuti pendekatan titik *sampling* pada danau atau waduk sesuai SNI 6989.57:2008, yaitu permukaan dan bagian dasar kolam dengan penentuan masing-masing satu titik. Hal ini karena kolam pengambilan sampel memiliki ukuran yang dangkal dengan penentuan titik *sampling* terdalam pada  $\pm 1,80$  m dari permukaan air kolam. Tiga titik *sampling* ditentukan dengan masing-masing jarak antar titik sebesar 3,4-3,5 m.

Ketiga titik *sampling* air asam tambang di antaranya, T1 yaitu  $\pm 5$  cm di atas permukaan matrik endapan tailing, T2 yaitu 1,60-1,65 m dari permukaan air kolam, dan T3 yaitu  $\pm 5$  cm dari permukaan air kolam. Pengambilan sampel ini dilakukan sebanyak dua kali masing-masing pada waktu yang berbeda, yaitu pukul 09.00 dan 13.00 WIB. Sampel tersebut menghasilkan dua macam sampel untuk dianalisis secara duplo dengan proses pengambilan menggunakan gayung bertangkai panjang. Menurut SNI 6989.57:2008 bahwa gayung bertangkai panjang merupakan alat pengambil sampel sederhana yang paling sering digunakan untuk mengambil sampel air permukaan yang relatif dangkal. Cara pengambilan sampel air asam tambang dilakukan dengan pengujian in-situ melalui pengukuran pH dan suhu pada masing-masing sumber (titik *sampling*) yang merujuk pada SNI 8990:2021.

Setelah hasil pengujian in-situ didapatkan nilai pH yang rendah, maka selanjutnya sampel uji batuan dan air asam tambang (untuk pengujian konsentrasi logam berat Fe sebelum dan setelah pengolahan) disimpan ke dalam wadah penyimpanan sampel yang harus dicuci dengan deterjen bebas fosfat dan disterilkan terlebih dahulu menggunakan asam nitrat. Namun, wadah sampel air asam tambang untuk pengujian pH ex-situ sebelum dan setelah pengolahan tidak disterilkan menggunakan asam nitrat, melainkan hanya menggunakan wadah siap pakai. Wadah sampel air asam tambang yang digunakan ialah derigen plastik Polietilena (PP), sedangkan sampel batuan menggunakan wadah plastik *High Density* Polietilena (HDPE). Wadah yang sudah diisi dengan sampel uji batuan kemudian disegel menggunakan aluminium *foil* untuk mencegah adanya kontaminasi. Prosedur persiapan wadah ini merujuk pada SNI 8990:2021 tentang Metode Pengambilan Contoh Uji Air Limbah untuk Pengujian Fisika dan Kimia, serta SNI 8520:2018 tentang Cara Pengambilan Contoh Uji Limbah B3 Padat. Persiapan wadah penyimpanan sampel dilakukan di Laboratorium Kimia (UPT Laboratorium Terpadu) Universitas Tanjungpura sebelum berangkat ke lokasi bekas PETI Mandor. Setelah persiapan wadah selesai, kemudian karaktersisasi sampel air asam tambang melalui pengujian pH ex-situ. Pada proses pengangkutan sampel uji dari lokasi bekas PETI Mandor menuju laboratorium, sampel dialas/ditutup menggunakan terpal agar terhindar dari kontaminasi selama perjalanan.

## B. Pengambilan Data Primer dan Sekunder

Adapun data primer pada penelitian ini, di antaranya sebagai berikut.

- 1) Titik koordinat dan dimensi kolam/lubang bukaan tersingkap di lahan bekas PETI Mandor;

- 2) Hasil karakterisasi sampel batuan dan air asam tambang melalui analisis pH, XRD, XRF, dan konsentrasi Fe (AAS) sebelum pengujian *fuel cell*.
- 3) Daya hantar listrik (tegangan dan kuat arus) pada pengujian *fuel cell* menggunakan elektrolit air asam tambang.
- 4) Hasil pengujian pH dan AAS setelah pengujian *fuel cell*.

Sedangkan data sekunder pada penelitian ini, yaitu Peta Geologi Lembar Singkawang Kalimantan Barat skala 1:250.000.

### C. Pemeriksaan Laboratorium Sampel

Pada tahap ini dilakukan sebanyak empat jenis pengujian ex-situ yang dilakukan di laboratorium, di antaranya ialah pengujian XRD, XRF, serta dua kali pengujian pH ex-situ dan AAS untuk masing-masing sampel sebelum dan setelah diolah. Perbedaan jenis sampel yang digunakan untuk keempat pengujian ini ialah sampel batuan digunakan untuk pengujian XRD dan XRF, sedangkan sampel air asam tambang digunakan untuk pengujian pH dan AAS.

Sampel batuan pada penelitian ini yaitu mineral sulfida yang berada pada tepi kolam/lubang bukaan tersingkap pengambilan sampel air asam tambang (kolam A) di lahan bekas PETI Mandor. Sampel ini dihancurkan dan dihaluskan terlebih dahulu menggunakan mortar pestle. Karakteristik sampel batuan pada pengujian XRD menggunakan sampel sebanyak 1 gram, sedangkan pengujian XRF sebanyak 5 gram. Dalam hal ini, pengujian XRD dan XRF memiliki bentuk akhir sampel berbentuk serbuk dari hasil ayakan/saringan 120 Mesh yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura, sedangkan pengujian XRD dan XRF dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju FMIPA Universitas Negeri Malang. Tujuan analisis XRD dan XRF ialah untuk menganalisis hasil karakterisasi mineralogi dan senyawa oksida pembentukan air asam tambang yang terkandung pada sampel batuan, di mana kedua pengujian ini menggunakan alat XRD-7000 Shimadzu dan XRF EDX-720 Shimadzu.

Adapun sampel air asam tambang digabungkan menjadi satu dari tiga titik *sampling* sebagai kesatuan sampel (homogen) sebelum pengujian *fuel cell*. Sampel air asam tambang ini dibutuhkan sebanyak 24 liter untuk sampel sebelum dan setelah pengujian menggunakan satu hingga tiga rangkaian *fuel cell* analisis duplo. Sampel ini diambil sebanyak 8 liter secara duplo pada dua waktu dari masing-masing tiga titik *sampling* kolam A.

Kemudian dilakukan pengujian ex-situ nilai pH dan konsentrasi logam berat Fe (AAS) pada sampel homogen untuk karakterisasi sampel air asam tambang. Selanjutnya sampel homogen air asam tambang tersebut digunakan sebagai elektrolit pada

pengujian *fuel cell* untuk mengukur daya hantar listrik. Sampel setelah dimanfaatkan sebagai elektrolit *fuel cell* kemudian diuji kembali nilai pH dan juga konsentrasi logam berat Fe dari masing-masing *fuel cell* yang telah diukur daya hantar listriknya dan dilanjutkan dengan analisis perubahan nilai pH dan konsentrasi logam berat Fe.

Pengujian pH dilakukan untuk mengukur derajat keasaman sampel air asam tambang pada masing-masing T1, T2 dan T3 secara ex-situ dan sampel yang telah homogen (sebelum pengolahan) maupun setelah dilakukan pengolahan. Pengujian pH secara ex-situ pada masing-masing titik *sampling* bertujuan untuk mendapatkan nilai pH dengan ketelitian  $\pm 0,01$  menggunakan pH meter. Adapun total sampel yang diuji nilai pH-nya ialah sebanyak tujuh sampel, yaitu rata-rata sampel sebelum pengolahan (satu sampel) dan setelah pengolahan (enam sampel) dari satu hingga tiga *fuel cell* analisis duplo. Pengujian pH sampel air asam tambang pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Kimia (UPT Laboratorium Terpadu) Universitas Tanjungpura. Standarisasi yang digunakan untuk cara uji pH dengan menggunakan pH Meter merujuk pada SNI 6989.11:2019.

Kemudian dilanjutkan dengan pengujian AAS menggunakan sampel yang sama dengan pengujian pH. Sampel yang digunakan pada pengujian logam berat Fe yaitu sampel sebelum pengolahan (sampel S1), sampel setelah pengolahan ulangan 1 dari satu *fuel cell* (sampel S2), dua *fuel cell* (sampel S3) dan tiga *fuel cell* (sampel S4), serta sampel setelah pengolahan ulangan 2 dari satu *fuel cell* (sampel S5), dua *fuel cell* (sampel S6) dan tiga *fuel cell* (sampel S7). Hasil pengujian AAS ini dianalisis apakah parameter uji (konsentrasi Fe) selaras dengan hasil pengujian XRD dan XRF yang diduga sebagai pemicu pembentukan air asam tambang. Pengujian AAS dilakukan dengan menggunakan alat AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*) di PT. Borneo Enviro Indonesia (Environmental Laboratory). Sementara itu, standarisasi yang digunakan untuk cara uji Fe secara AAS sesuai dengan SNI 6989.84:2019.

Setelah diperoleh hasil pengujian pH dan konsentrasi logam berat Fe (AAS), selanjutnya dianalisis apakah pengolahan tailing air asam tambang dengan cara dimanfaatkan sebagai elektrolit *fuel cell* dapat menghasilkan buangan limbah yang sesuai dengan standar baku mutu air limbah untuk pH dan konsentrasi Fe sebagaimana disebutkan pada Lampiran XLVII Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau Kegiatan yang Belum Memiliki Baku Mutu Air Limbah yang ditetapkan. Kemudian hasil dari analisis pH dan konsentrasi Fe, dihitung persentase (%) kenaikan pH dan penurunan

konsentrasi Fe yang diperoleh. Nilai persentase ini diukur dengan membandingkan perubahan nilai kedua parameter uji ini, baik sebelum maupun setelah dilakukan pengolahan air asam tambang.

#### D. Pengujian *Fuel Cell*

Pengujian rangkaian *fuel cell* bertujuan untuk melakukan pengolahan tailing air asam tambang yang diperoleh dari lahan bekas PETI Mandor dengan cara dimanfaatkan sebagai elektrolit *fuel cell*. Adapun pengujian ini dilakukan di Laboratorium Elektroteknika Dasar, Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Tahap pertama yang dilakukan yaitu membuat *fuel cell* dengan menggunakan elektroda karbon (C) dan aluminium (Al). Elektroda C tersebut sebagai elektroda positif (katoda) dengan diameter 3 mm berbentuk lembaran, sedangkan elektroda Al sebagai elektroda negatif (anoda) berdiameter 22,22 mm dengan bentuk batangan.

Pada penelitian ini terdapat dua faktor yang mempengaruhi reaksi elektrokimia, di antaranya variasi jumlah sel dan lampu pijar, serta variasi waktu kerja sel terhadap daya hantar listrik yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pasangan elektroda C-Al. Pemilihan elektroda C-Al didasarkan pada penyesuaian sifat elektroda terhadap larutan elektrolit air asam tambang, yaitu di antaranya ialah memiliki daya hantar listrik yang baik dan anti korosi (tidak terkorosi oleh Fe) (Nasution, 2018; Ali dkk, 2019).

Setelah elektrolit air asam tambang dimasukkan ke dalam tabung *fuel cell*, selanjutnya ialah mengalirinya daya hantar listrik ke lampu pijar (beban) 3 V sebagai pengujian kualitatif untuk menguji waktu maksimum dan tingkat nyala lampu. Selain itu juga dilakukan pengukuran daya hantar listrik sebagai pengujian kuantitatif dengan menggunakan multimeter. Dalam hal ini diuji seberapa besar waktu kerja sel terhadap lama dan tingkat nyala lampu mempengaruhi daya hantar listrik yang dihasilkan. Pengujian nyala lampu ini dilakukan pada kondisi intensitas cahaya ruangan yang sama dan gambar diambil menggunakan kamera. Apabila lampu redup atau tidak dapat menyala kembali, maka artinya daya hantar listrik yang dialirkan telah berkurang dan waktu kerja *fuel cell* telah berakhir. Besaran daya hantar listrik yang diperoleh berdasarkan pengujian dilakukan pada perlakuan variasi waktu 0, 3, 6, 9, 12 dan 15 jam (Islamunisa dkk, 2018). Pengujian serupa pada masing-masing waktu perlakuan tersebut dilakukan analisis secara duplo menggunakan *stopwatch*.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Potensi Air Asam Tambang pada Lahan Bekas PETI Mandor

Pada lahan bekas PETI Mandor dilakukan penjelajahan dengan luas sebesar 1.000 Ha. Selama penjelajahan berlangsung, ditemukan sebanyak sembilan lubang bukaan tersingkap yang memiliki indikator kehadiran air asam tambang yaitu ditandai dengan kolam berwarna orange-coklat dan air jernih tidak alami yang terindikasi memiliki derajat keasaman yang rendah (tingkat keasaman tinggi), serta terdapatnya endapan tailing yang mengandung mineral sulfida. Kesampaian lokasi penelitian ini tepat berada di jalan utama Desa Mandor Kecamatan Mandor. Berdasarkan koordinat lahan terdampak akibat aktivitas bekas PETI ini, peneliti telah menetapkan lokasi pengambilan sampel menggunakan GPS pada titik koordinat 0°19'50,988" Lintang Utara (LU) dan 109°20'19,29" Bujur Timur (BT) (Gambar 2). Luas permukaan kolam/lubang bukaan tersingkap yang menjadi pilihan lokasi pengambilan sampel uji (kolam A) ialah sebesar 21,56 m<sup>2</sup> dengan kedalaman 0,8 hingga 3,3 meter. Kolam A merupakan lubang bukaan singkapan yang paling luas dibandingkan delapan singkapan lainnya (kolam B hingga I). Adapun tampilan batuan sulfida pada tepi kolam A, disajikan pada Gambar 3.



Gambar 2. Pengambilan titik koordinat menggunakan GPS pada kolam (Sumber : Dokumentasi)



Gambar 3. Keterdapatannya batuan sulfida di tepi kolam A (Sumber : Dokumentasi)

Pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa total volume kolam/lubang bukaan pada lahan bekas PETI Mandor secara keseluruhan ialah 22,40 m<sup>3</sup>, sehingga volume air asam tambang pada kolam yang

berpotensi dimanfaatkan sebagai elektrolit *fuel cell* adalah 22.400 liter.

Tabel 1. Total Volume Lubang Bukaan pada Lahan Bekas PETI Mandor (Sumber : Hasil Pengukuran)

No	Nama Kolam	Luas Permukaan (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
1	A	21,56	10,25
2	B	12,00	1,91
3	C	10,30	2,28
4	D	8,50	2,61
5	E	6,00	2,50
6	F	3,20	1,24
7	G	3,02	1,00
8	H	2,30	0,54
9	I	1,20	0,06
<b>Total Volume</b>			<b>22,40</b>

## B. Karakteristik Sampel Batuan dan Air Asam Tambang

### 1) Pengujian XRD

Hasil uji XRD yang telah diuji setelah diolah menggunakan *software Match! version 3.3*, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Difraktogram XRD setelah diolah menggunakan *Match! version 3.3* (Sumber : Hasil Analisis)

Menurut hasil pengujian XRD, diterangkan bahwa sampel uji (batuan) didominasi oleh mineral pirit ( $\text{FeS}_2$ ). Pirit terbentuk dari unsur besi (Fe) dan sulfur (S) yang berikatan membentuk mineral sulfida sangat reaktif dalam pembentukan asam. Hal ini dapat mempertegas bahwa pirit merupakan faktor utama penyebab pembangkit sifat asam pada batuan karena pirit salah satu mineral sulfida yang paling sering dijumpai sebagai jenis batuan yang berpotensi pembentukan asam (*Potential Acid Forming*, PAF) (Widodo dkk, 2019). Sebagaimana teori yang dikemukakan oleh Nursahan (2005) dan Kilian dkk (2018), bahwa rambergite, molibdenit dan spalerit ialah mineral yang sama dengan pirit yang juga merupakan jenis batuan yang berpotensi pembentukan asam (PAF). Adapun mineral-mineral tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan Mineral Sampel Batuan menggunakan XRD (Sumber : Hasil Analisis)

No	Mineralogi	Rumus Kimia
1	Pirit	$\text{FeS}_2$
2	Rambergit	$\text{Fe}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$
3	Molibdenit	$\text{MoS}_2$
4	Spalerit	$\text{SZn}$

### 2) Pengujian XRF

Keterdapatannya Fe dan S dalam jumlah yang paling besar pada sampel batuan menunjukkan adanya hasil oksidasi mineral sulfida yang terendam oleh air sebagai pembentukan air asam tambang dan mendukung hasil XRD yang menunjukkan adanya keberadaan pirit, rambergite, molibdenit, dan spalerit (Ariansyah, 2019).

Tabel 3. Hasil Kuantitatif Unsur maupun Senyawa Oksida Uji XRF (Sumber : Hasil Analisis)

No	Unsur	Konsentrasi (%)	Senyawa Oksida	Konsentrasi (%)
1	Fe	52,46	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	37,91
2	S	24,4	$\text{SO}_3$	37,40
3	Mo	9,50	$\text{MoO}_3$	8,80
4	Si	6,90	$\text{SiO}_2$	9,60
5	Ca	2,48	$\text{CaO}$	1,98
6	Al	2,30	$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,90
7	K	0,73	$\text{K}_2\text{O}$	0,51
8	Ti	0,42	$\text{TiO}_2$	0,40
9	Rb	0,21	$\text{Rb}_2\text{O}$	0,11
10	Br	0,15	Br	0,07
11	Re	0,10	$\text{Re}_2\text{O}_7$	0,09
12	Cr	0,08	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,07
13	Mn	0,08	$\text{MnO}$	0,05
14	Zn	0,08	$\text{ZnO}$	0,05
15	Cu	0,06	$\text{CuO}$	0,03
16	V	0,02	$\text{V}_2\text{O}_5$	0,02

Berdasarkan Tabel 3 diketahui bahwa konsentrasi beberapa unsur yang dijumpai pada air asam tambang melampaui nilai ambang batas logam berat pada batuan atau tanah sebagaimana Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Baku mutu logam berat yang terkandung pada sampel uji batuan sebagai pemicu pembentukan air asam tambang, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Baku Mutu Logam Berat Pembentukan Air Asam Tambang di Lahan Bekas PETI Mandor Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 5 Tahun 2014 (Sumber : Hasil Analisis)

No	Unsur dalam Air Asam Tambang	Hasil XRF (mg/liter)	Nilai Ambang Batas (mg/liter)
1	Fe	$5,246 \times 10^5$	5
2	S	$2,440 \times 10^5$	0,5 untuk $\text{H}_2\text{S}$

No	Unsur dalam Air Asam Tambang	Hasil XRF (mg/liter)	Nilai Ambang Batas (mg/liter)
3	Mn	780	2
4	Zn	780	5

### 3) Pengujian pH sebelum Pengujian *Fuel Cell*

Sampel air asam tambang sebelum dilakukan pengolahan menggunakan *fuel cell* setelah dicampur (homogen) dari ketiga titik *sampling* memiliki nilai pH sebesar 2,1.

### 4) Pengujian Konsentrasi Fe sebelum Pengujian *Fuel Cell*

Berdasarkan hasil karakterisasi sampel air asam tambang diketahui bahwa sebelum dilakukan pengolahan menggunakan rangkaian *fuel cell*, memiliki nilai konsentrasi Fe yang besar yaitu 6,67 mg/liter.

## C. Pengujian *Fuel Cell*



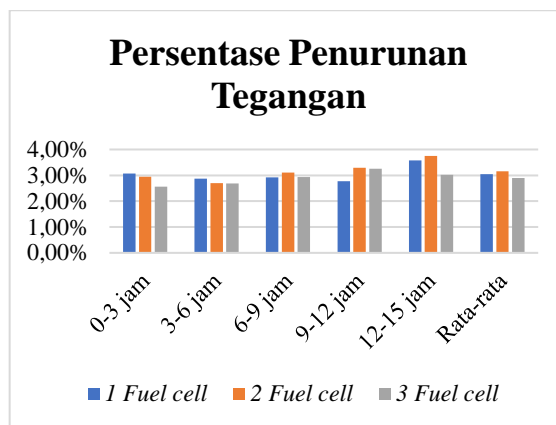
Gambar 5. Persiapan pengujian *fuel cell*  
(Sumber : Dokumentasi)

Untuk menghasilkan energi listrik pada pengujian *fuel cell* ini dilakukan dengan variasi waktu 0, 3, 6, 9, 12 dan 15 jam. Variasi waktu kerja *fuel cell* ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar waktu kerja *fuel cell* mempengaruhi nilai tegangan dan kuat arus yang dihasilkan, serta waktu maksimum dan tingkat nyala lampu (Islamunisa dkk, 2018; Reza dkk, 2019).

Menurut data pengamatan pada Gambar 6 dan 7, dapat diketahui bahwa waktu kerja *fuel cell* mempengaruhi tegangan dan kuat arus yang dihasilkan. Di mana semakin lama *fuel cell* bekerja maka tegangan dan kuat arus yang dihasilkan juga semakin berkurang. Hal ini terjadi karena saat *fuel cell* bekerja, terjadi reaksi di dalam larutan elektrolit yang menyebabkan konsentrasi ion semakin berkurang karena terjadi proses kesetimbangan. *Fuel cell* yang reaksinya berada dalam kesetimbangan tidak dapat melakukan kerja sehingga semakin lama *fuel cell* tersebut digunakan, energi listrik yang dihasilkan semakin berkurang dan habis yang ditandai dengan semakin redupnya lampu pijar (Reza dkk, 2019).

### 1) Pengukuran Tegangan *Fuel Cell*

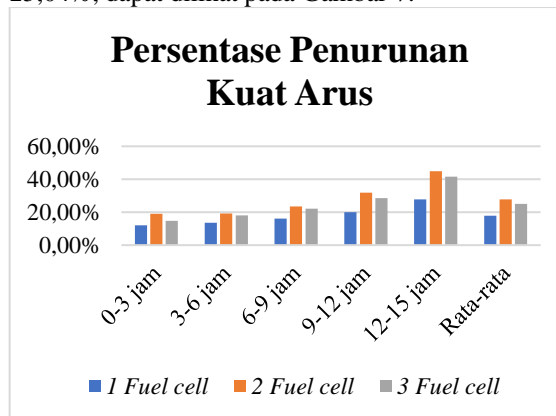
Pada waktu 0 jam, yaitu saat *fuel cell* belum diberikan beban didapatkan rata-rata tegangan tertinggi pada satu hingga tiga rangkaian *fuel cell*, sedangkan tegangan terendah diperoleh pada jam ke-15. Adapun persentase penurunan tegangan dari 0 hingga 15 jam yaitu sebesar 3,04% pada satu *fuel cell*, 3,16% pada dua *fuel cell*, dan 2,89% pada tiga *fuel cell*. Persentase penurunan tegangan ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Persentase penurunan tegangan  
(Sumber : Hasil Analisis)

### 2) Pengukuran Kuat Arus *Fuel Cell*

Rata-rata kuat arus tertinggi pada 0 jam dan rata-rata kuat arus terendah pada jam ke-15. Adapun urutan persentase penurunan kuat arus pada satu hingga tiga *fuel cell*, yaitu 17,92%, 27,70% dan 25,04%, dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Persentase penurunan kuat arus  
(Sumber : Hasil Analisis)

### 3) Hubungan Tegangan dan Kuat Arus *Fuel Cell*

Nilai tegangan dan kuat arus hasil penelitian ini menunjukkan semakin meningkat seiring bertambahnya jumlah sel, disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Tegangan dan Kuat Arus Masing-masing Variasi Jumlah Sel dan Lampu Pijar (*Sumber : Hasil Analisis*)

Variasi Jumlah Sel ( <i>fuel cell</i> )	Volume Sel (liter)	Tegangan Keseluruhan (V)	Kuat Arus Keseluruhan (A)
Satu	0,7	3,443	0,0459
Dua	1,4	6,858	0,0608
Tiga	2,1	10,250	0,0963

Setelah pengujian *fuel cell* dilakukan, kemudian mengestimasi potensi pengembangan pengujian *fuel cell* (Tabel 6).

Tabel 6. Potensi Pengembangan Pengujian *Fuel Cell* (*Sumber : Hasil Analisis*)

Variasi Jumlah Sel ( <i>fuel cell</i> )	Potensi Pengembangan Pengujian <i>Fuel Cell</i> sebanyak 22.400 Liter			
	Total Sel (liter)	Tegangan (Volt) $V$	Kuat Arus (Ampere) $I$	Daya (Watt) $P = V \times I$
Satu	31.994,29	110.156,326	1.468,5377	161.768.718,78
Dua	15.997,14	109.708,406	972,6263	106.705.279,16
Tiga	10.664,76	109.313,810	1.027,0166	112.267.093,87

Tabel 7. Potensi Daya Hantar Listrik per Liter (*Sumber : Hasil Analisis*)

Variasi Jumlah Sel ( <i>fuel cell</i> )	Potensi Pengembangan Pengujian <i>Fuel Cell</i> per Liter		
	Tegangan (Volt) $V$	Kuat Arus (Ampere) $I$	Daya (Watt) $P = V \times I$
Satu	4,919	0,0656	0,32
Dua	4,899	0,0434	0,21
Tiga	4,881	0,0459	0,22
<b>Rata-rata</b>	<b>4,899</b>	<b>0,0516</b>	<b>0,25</b>

Maka dari itu, potensi daya hantar listrik yang dihasilkan oleh pengujian *fuel cell* dalam satu liter dari potensi air asam tambang pada kolam tersingkap di lahan bekas PETI Mandor ialah sebesar 0,25 Watt (Tabel 7).

#### 4) Pengujian Nyala Lampu pada *Fuel Cell*

Berdasarkan hasil pengujian nyala lampu dengan waktu yang telah ditentukan, lampu pijar masih dalam keadaan menyala walaupun variasi waktu yang digunakan pada penelitian ini telah berakhir, yaitu selama 15 jam. Namun, nyala lampu pada setiap variasi jumlah *fuel cell* diketahui semakin lama semakin redup. Adapun tingkat nyala lampu pada 15 jam > 12 jam > 9 jam > 6 jam > 3 jam > 0 jam.

#### D. Pengujian pH setelah Pengujian *Fuel Cell*

Pada reaksi elektrokimia terbentuk gas hidrogen sebagai hasil reaksi dari proses reduksi  $H_2O$ . Gelembung-gelembung halus gas hidrogen ini

cenderung untuk melepaskan diri dari katoda. Peristiwa ini menghasilkan pembentukan ion  $OH^-$  semakin banyak dalam satuan waktu yang relatif cepat dibandingkan dengan pembentukan ion  $H^+$ . Kondisi awal ini menyebabkan nilai pH berubah menjadi lebih tinggi (Reza dkk, 2019).

Rata-rata nilai pH menunjukkan bahwa pH sampel air asam tambang setelah dilakukan pengolahan dengan pengujian *fuel cell* mengalami peningkatan atau tingkat keasaman berkurang dari sampel sebelum pengolahan. Sampel sebelum pengolahan memiliki nilai pH sebesar 2,1, sedangkan sampel setelah digunakan sebagai elektrolit *fuel cell* menunjukkan nilai pH yang meningkat seiring bertambahnya jumlah *fuel cell* sehingga tingkat keasaman larutan (elektrolit asam kuat) tersebut semakin berkurang (Tabel 8). Sebagaimana yang dikemukakan oleh Harahap (2016), bahwa larutan elektrolit asam yang memiliki nilai pH berubah menjadi lebih tinggi apabila daya hantar listrik pada larutan tersebut semakin menurun.

Tabel 8. Rata-rata Nilai pH (*Sumber : Hasil Pengujian*)

Parameter	Pengujian Rangkaian <i>Fuel Cell</i>			
	SEBELUM	SETELAH		
		Satu <i>Fuel Cell</i>	Dua <i>Fuel Cell</i>	Tiga <i>Fuel Cell</i>
pH	2,1	4,1	4,4	4,8

Sebagaimana Lampiran XLVII Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau Kegiatan yang Belum Memiliki Baku Mutu Air Limbah yang ditetapkan, nilai pH bisa dikatakan belum memenuhi baku mutu karena melampaui nilai ambang batasnya yaitu 6-9 pada golongan I. Selanjutnya ialah menghitung performansi dari reaksi elektrokimia terhadap kenaikan pH setelah pengujian *fuel cell*, disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Perubahan Nilai pH (*Sumber : Hasil Analisis*)

Variasi Jumlah Sel ( <i>fuel cell</i> )	Volume Sel (liter)	Perubahan Nilai pH
Satu	0,7	48,78%
Dua	1,4	52,27%
Tiga	2,1	56,25%

Tahap ini bertujuan untuk menganalisis persentase (%) perubahan parameter uji yaitu perubahan nilai pH. Pada Tabel 9, diketahui bahwa persentase keberhasilan reaksi elektrokimia pada pengujian *fuel cell* selama 15 jam dapat dikatakan belum mampu untuk menentralkan pH air asam tambang.



### E. Pengujian Konsentrasi Fe setelah Pengujian *Fuel Cell*

Pembentukan koagulan  $\text{Al}(\text{OH})_3$  pada reaksi elektrokoagulasi digunakan untuk proses pengelompokan Fe yang telah berubah menjadi solid saat kondisi air memiliki nilai pH berubah menjadi lebih tinggi pada pembentukan ion  $\text{OH}^-$ . Hal ini terjadi karena koagulan  $\text{Al}(\text{OH})_3$  mengikat keberadaan Fe yang telah berubah menjadi  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  di dalam air membentuk flok-flok dan terflotasi oleh gelembung hidrogen. Setelah proses koagulasi-flokulasi ini selesai maka kontaminan-kontaminannya yang berada dalam air buangan dapat terpresipitasi dengan sendirinya (Rusdianasari dkk, 2013).

Rata-rata hasil pengujian konsentrasi logam berat Fe untuk keseluruhan sampel ditunjukkan pada Tabel 10. Konsentrasi Fe setelah pengujian *fuel cell* menunjukkan konsentrasi yang terus menurun seiring bertambahnya jumlah *fuel cell* dan lampu pijar.

Tabel 10. Rata-rata Konsentrasi Logam Berat Fe (AAS) (Sumber : Hasil Pengujian)

Parameter	Pengujian Rangkaian <i>Fuel Cell</i>			
	SEBELUM	SETELAH		
		Satu <i>Fuel Cell</i>	Dua <i>Fuel Cell</i>	Tiga <i>Fuel Cell</i>
Logam Berat Fe	6,67 mg/liter	0,14 mg/liter	0,10 mg/liter	0,04 mg/liter

Berdasarkan Tabel 10, konsentrasi Fe dapat dikatakan telah memenuhi standar baku mutu karena tidak melampaui nilai ambang batasnya yaitu 5 mg/liter pada golongan II sesuai Lampiran XLVII Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau Kegiatan yang Belum Memiliki Baku Mutu Air Limbah yang ditetapkan. Langkah selanjutnya ialah menghitung performansi dari proses elektrokoagulasi terhadap penurunan konsentrasi Fe setelah pengujian *fuel cell* (Tabel 11).

Tabel 11. Perubahan Konsentrasi Logam Berat Fe (AAS) (Sumber : Hasil Analisis)

Variasi Jumlah Sel ( <i>fuel cell</i> )	Volume Sel (liter)	Perubahan Konsentrasi Fe
Satu	0,7	97,90%
Dua	1,4	98,50%
Tiga	2,1	99,40%

Tahap ini bertujuan untuk menganalisis persentase (%) perubahan parameter uji yaitu perubahan konsentrasi Fe. Pada Tabel 11, diketahui bahwa persentase keberhasilan proses elektrokoagulasi pada pengujian *fuel cell* selama 15 jam dapat dikatakan mampu untuk mereduksi

konsentrasi Fe dengan efektivitas 97,90% pada satu *fuel cell*, 98,50% pada dua *fuel cell*, dan 99,40% pada tiga *fuel cell*.

### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- 1) Volume air asam tambang pada kolam yang berpotensi dimanfaatkan sebagai elektrolit *fuel cell* adalah 22.400 liter.
  - 2) Sampel air asam tambang sebelum pengujian *fuel cell* memiliki pH 2,1. Pada sampel batuan, hasil uji XRD diterangkan bahwa sampel mengandung mineral pirit ( $\text{FeS}_2$ ), rambergit, molibdenit, dan spalerit, sedangkan hasil uji XRF terdeteksi Fe dan S dalam jumlah yang paling besar yaitu sekitar 52,46% dan 24,4%. Berdasarkan hasil uji AAS, sampel air asam tambang sebelum pengujian *fuel cell* juga memiliki konsentrasi Fe sebesar 6,67 mg/liter.
  - 3) Semakin lama sel bekerja, semakin kecil nilai tegangan, kuat arus dan nyala lampu. Semakin banyak jumlah sel yang digunakan maka semakin besar pula nilai tegangan, kuat arus dan nyala lampu. Potensi daya hantar listrik dalam satu liter dari potensi air asam tambang pada kolam tersingkap di lahan berkas PETI Mandor ialah sebesar 0,25 Watt.
  - 4) Berdasarkan variasi waktu 0 hingga 15 jam, penelitian ini menaikkan pH menjadi 4,1 dengan efektivitas 48,78% (satu *fuel cell*), 4,4 dengan efektivitas 52,27% (dua *fuel cell*), dan 4,8 dengan efektivitas 56,25% (tiga *fuel cell*). Hasil ini belum dapat mencapai baku mutu 6-9 sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Namun mampu menurunkan konsentrasi logam berat Fe menjadi 0,14 mg/liter dengan efektivitas 97,90% (satu *fuel cell*), 0,10 mg/liter dengan efektivitas 98,50% (dua *fuel cell*), dan 0,04 mg/liter dengan efektivitas 99,40% (tiga *fuel cell*) karena tidak melampaui standar baku mutu 5 mg/liter sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
- Demi perbaikan dan kesempurnaan penelitian yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan sebagai berikut.
- 1) Disarankan penelitian selanjutnya dapat menggunakan variasi waktu lebih dari 15 jam hingga mencapai pH netral sesuai standar baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
  - 2) Pada pengujian *fuel cell* selanjutnya dapat menggunakan variasi volume elektrolit dan jumlah sel (*fuel cell*) yang berbeda.

## REFERENSI

- Ali, M. S., Praktikno, H., dan Dhanistha, W. L. (2019). Analisis Pengaruh Variasi Sudut Blasting dengan *Coating* Campuran Epoxy dan Aluminium Serbuk terhadap Kekuatan Adhesi, Prediksi Laju Korosi, dan Morfologi pada Plat Baja ASTM A36. *Jurnal Teknik ITS*, 8 (1), G64-G70.
- Ariansyah, M. R., Anas, N. A., Sari, N. R., dan Pahlevi, M. R. (2019). Karakteristik dan Genesa Sampel Mineral di Daerah Sapaya menggunakan Metode Megaskopis. *Jurnal Geoelebes*, 3 (1), 38-41.
- Ashari. (2016). Analisa Elektrokoagulasi Air Asam Tambang terhadap Nilai pH dan Kadar Fe. *Jurnal Surya Energy*, 1 (1), 1-6.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI 6989.11:2019). (2019). Air dan Air Limbah - Bagian 11: *Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan pH Meter*, 26 Mei.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI 6989.57:2008). (2008). Air dan Air Limbah - Bagian 57: *Metode Pengambilan Contoh Air Permukaan*, 28 Mei.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI 6989.84:2019). (2019). Air dan Air Limbah - Bagian 84: *Cara Uji Kadar Logam Terlarut dan Logam Total secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) - Nyala*, 4 Oktober.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI 8520:2018). (2018). *Cara Pengambilan Contoh Uji Limbah B3 Padat*, 30 April.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI 8990:2021). (2021). *Metode Pengambilan Contoh Uji Air Limbah untuk Pengujian Fisika dan Kimia*, 9 Agustus.
- Harahap, M. R. (2016). Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi. *Circuit*, 2 (1), 177-180.
- Islamunisa, F., Bohari., dan Panggabean, A. S. (2018). Pemanfaatan Air Asam Tambang Batubara sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif. *Jurnal Atomik*, 3 (1), 22-25.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (KEPMEN ESDM RI) No. 1827/K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Jakarta: Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah*. Jakarta: Menteri Lingkungan Hidup RI.
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta: Menteri Sekretariat RI.
- Kilian, A., Widodo, S., dan Jafar, N. (2018). Analisis Karakteristik Limbah Pengolahan Emas dan Potensi Pemicu Air Asam Tambang pada Pertambangan Rakyat Kelurahan Poboya Kab. Donggala, Prov. Sulawesi Tengah. *Jurnal Geomine*, 6 (2), 49-53.
- Nasution, M. (2018). Karakteristik Baja Karbon Terkorosi oleh Air Laut. *Buletin Utama Teknik*, 14 (1), 68-76.
- Nursahan, I. (2005). Inventarisasi dan Evaluasi Mineral Logam di Daerah Kabupaten Bengkayang dan Kabupaten Landak Provinsi Kalimantan Barat. *Kolokium Hasil Lapangan: DIM (Daftar Inventaris Masalah)*, Bandung. <http://psdg.bgl.esdm.go.id/kolokium/Logam/15.Proceeding%20Bengkayang-Landak%20II%20-%20EDIT.pdf>.
- Pohan, M. P. (2007). *Tinjauan Pemanfaatan Tailing Tambang Bijih untuk Bahan Bangunan sebagai Solusi di Bidang Kontruksi*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Badan Geologi. [http://psdg.bgl.esdm.go.id/index.php?option=com\\_content&id=608](http://psdg.bgl.esdm.go.id/index.php?option=com_content&id=608).
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. (1993). *Peta Geologi Lembar Singkawang Kalimantan Barat 1316, skala 1:250.000*. Bandung: Departemen Pertambangan dan Energi.
- Reza, M., Sari, N. P., Akbar, M. F., dan Novianti, Y. S. (2019). Pemanfaatan Reaksi Elektrokimia untuk Sumber Energi Listrik Alternatif serta Netralisasi pada Air Asam Bekas Tambang. *Jurnal GEOSAPTA*, 5 (1), 51-55.
- Rusdianasari., Bow, Y., dan Taqwa, A. (2013). *Pengolahan Limbah Cair Stockpile Batubara untuk Mengurangi Pencemaran Lingkungan (Laporan Akhir Penelitian Hibah Bersaing)*. Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Suhendra. (2021). 1000 Hektar Lahan di Kalbar Rusak Akibat PETI. *Suara Landak* (Pontianak), 5 November.
- Triana, L., Nurjazuli., dan Endah W, N. (2012). Analisis Cemaran Logam Berat Merkuri pada Air dan Udang di Sungai Mandor Kecamatan Mandor Kabupaten Landak. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 11 (2), 144-152.
- Widodo, S., dkk. (2019). Karakteristik Mineral Pirit pada Batubara Berdasarkan Hasil Analisis Mikroskopi, Proksimat, Total Sulfur, dan Difraksi Sinar X: Potensi Terjadinya Air Asam Tambang. *Jurnal GEOSAPTA*, 5 (2), 121-126.