

Pengaruh Oksigen Dalam Uji Potensi Pembentukan Air Asam Tambang Menggunakan *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

Randy Arief Prambudi¹ dan Candra Nugraha²

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITENAS, Bandung, Indonesia

Email: randyariefp@gmail.com¹, Candra.nugraha@gmail.com²

Received | Revised | Accepted

ABSTRAK

Air asam tambang (AAT) adalah air yang memiliki nilai pH rendah atau air yang memiliki tingkat keasaman tinggi sebagai akibat dari proses oksidasi mineral sulfida. Oksidasi mineral sulfida terjadi karena terdedahnya batuan pirit yang kemudian mengalami kontak dengan oksigen dan air, dimana oksigen merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi laju oksidasi mineral sulfida. Hasil dari reaksi oksidasi tersebut dapat menyebabkan perubahan kualitas air limpasan atau air tanah. Upaya untuk mencegah terbentuknya air asam tambang adalah dengan memutus rantai kontak antara ketiga komponen tersebut, salah satunya dengan menggunakan material fly ash dan bottom ash sebagai material penutup batuan yang mengandung pirit. Salah satu metode untuk memprediksi pembentukan AAT adalah dengan metode Free Draining Column Leach Test. Terdapat 3 skenario pelapisan dalam penelitian ini. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa secara statistik, keberadaan oksigen menghasilkan perbedaan nilai pH yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada seluruh skenario pelapisan serta perbedaan nilai TDS dan DHL yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3 pelapisan.

Kata kunci: air asam tambang, pirit, oksigen, abu terbang, abu dasar

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is water that has a low pH value or water that has a high acidity as a result of the oxidation process of sulfide minerals. The oxidation of sulfide minerals occurs due to the exposure of pyrite rock which then comes into contact with oxygen and water, where oxygen is one of the factors that affects the rate of oxidation of sulfide minerals. The result of this oxidation reaction can cause changes in the quality of runoff water or groundwater. Efforts to prevent the formation of acid mine drainage are by breaking the contact chain between the three components, one of which is by using fly ash and bottom ash as a rock covering material containing pyrite. One method to predict the formation of AAT is the Free Draining Column Leach Test method. There are 3 layering scenarios in this study. The results obtained showed that statistically, the presence of oxygen resulted in a significant difference in pH values between the unaerated and aerated cylinders in all layering scenarios as well as significant differences in TDS and EC values between unaerated and aerated cylinders in the 3 layering scenario.

Keywords: acid mine drainage, pyrite, oxygen, fly ash, bottom ash

1. PENDAHULUAN

Saat ini, kegiatan pertambangan masih menimbulkan permasalahan lingkungan yang dapat merusak ekosistem dan kesehatan makhluk hidup. Salah satu permasalahan serius yang timbul akibat kegiatan pertambangan adalah terbentuknya air asam tambang (*acid mine drainage*). Air asam tambang ini sangat berbahaya bagi lingkungan karena tingkat keasamannya yang tinggi mudah melarutkan logam-logam berat. Larutnya logam-logam tersebut dapat merusak biota perairan yang ada di suatu badan air dan juga dapat menimbulkan berbagai macam penyakit bagi manusia atau makhluk hidup yang mengkonsumsi air tersebut. [1]

Air asam tambang ini terbentuk dari kegiatan penggalian dan penimbunan yang mengakibatkan terdedahnya batuan sehingga memungkinkan kontak dengan udara dan air. Reaksi oksidasi yang terjadi akibat kontak antara mineral sulfida, udara, dan air akan menghasilkan produk diantaranya adalah logam, sulfat, dan keasaman. Hasil dari reaksi kimia tersebut dapat mengakibatkan perubahan kualitas air limpasan atau air tanah. [1]

Upaya untuk mencegah terbentuknya air asam tambang adalah dengan memutus rantai kontak antara pirit, oksigen, dan air. Metode yang dapat digunakan untuk mencegah terbentuknya AAT adalah dengan metode enkapsulasi dan pelapisan, dimana prinsip dari metode ini adalah menutupi material pirit yang berpotensi menghasilkan asam (PAF) dengan material yang tidak berpotensi membentuk asam (NAF). Laju reaksi oksidasi mineral sulfida dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya adalah konsentrasi dan transport oksigen. Dimana meningkatnya konsentrasi oksigen akan mempercepat laju oksidasi, baik terjadi di atmosfer maupun di air. Konsentrasi dan transport oksigen di dalam air akan mempengaruhi reaktivitas pirit. [1]

Naskah ini dibuat untuk mengetahui bagaimana pengaruh oksigen dalam uji potensi pembentukan air asam tambang (AAT) menggunakan metode *free draining column leach test* (FDCL) dengan memanfaatkan sisa pembakaran batubara pada boiler pembangkit listrik tenaga uap yaitu *fly ash* dan *bottom ash* sebagai material penutup batuan yang mengandung pirit. Pengaruh oksigen dilihat berdasarkan perbandingan kualitas air hasil uji pembentukan air asam tambang pada tabung uji FDCL yang diberi perlakuan aerasi dan tidak. Parameter kualitas air yang diuji diantaranya adalah pH, TDS, DHL, Fe, Mn, dan SO_4^{2-} karena parameter-parameter tersebut merupakan parameter yang sangat erat kaitannya dengan air asam tambang.

2. METODOLOGI

2.1 Persiapan Sampel

Terdapat empat jenis sampel yang akan digunakan dalam penelitian ini, diantaranya yaitu *fly ash* (FA), *bottom ash* (BA), pirit (PAF) dan campuran *fly ash & bottom ash* (FABA). Sampel dihaluskan terlebih dahulu dengan cara digerus menggunakan *crusher* dan kemudian untuk sampel pirit dan *bottom ash* disaring. Pirit disaring menggunakan saringan berukuran 10 mesh, sedangkan *bottom ash* disaring menggunakan saringan berukuran 200 mesh. Setelah itu dilakukan *blending* terhadap sampel *fly ash* dan *bottom ash* dengan perbandingan 1:1.

2.2 Metode Pengukuran Kualitas Air

Parameter kualitas air yang diuji diantaranya adalah pH, TDS, DHL, Fe, Mn, dan SO_4^{2-} . Metode yang digunakan untuk pengukuran kualitas air hasil uji adalah sebagai berikut:

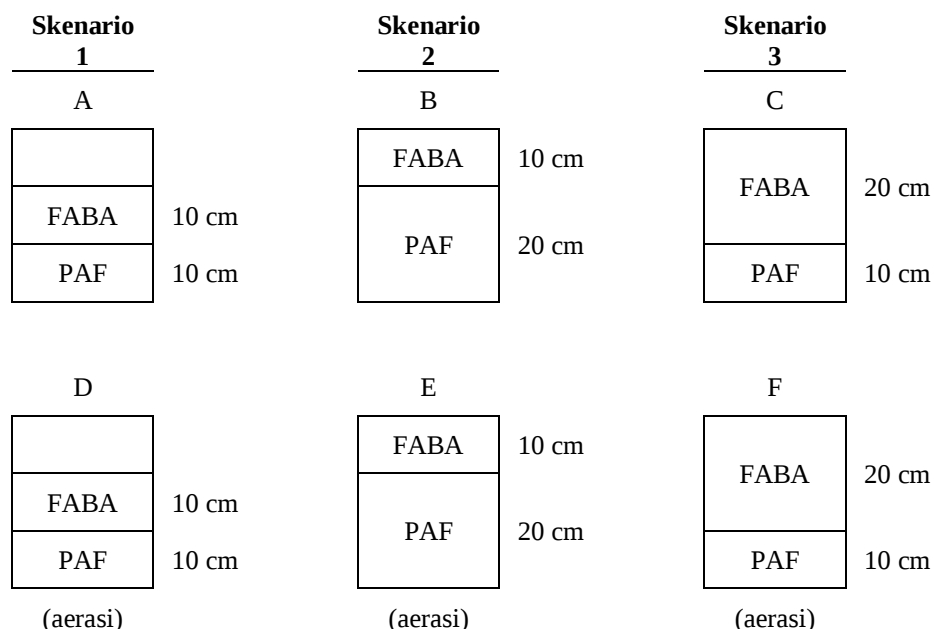
Tabel 1. Metode Pengukuran Kualitas Air

No.	Parameter	Metode	Sumber
1	pH	Potensiometri	SNI 06-6989.11-2004
2	TDS	Konduktimetri	-

No.	Parameter	Metode	Sumber
3	DHL	Konduktimetri	SNI 06-6989.1-2004
4	Fe	Fenantrolin-Spektrofotometri	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd edition</i>
5	Mn	Kolorimetri	SNI-06-6855-2002
6	Sulfat	Turbidimetri	SNI-6898-20:2009

2.3 Uji *Free Draining Column Leach Test*

Reaktor yang digunakan untuk uji FDCL ini berbentuk tabung dengan diameter 16 cm dan tinggi 40 cm. Pada bagian dasar tabung diberi sebuah plat berlubang yang dilapisi oleh kain dan dipasang keran air untuk mengalirkan air lindian. Untuk menentukan perbandingan kualitas air lindian, dirancang 3 skenario lapisan pada tabung yang terdiri dari batuan pirit sebagai material PAF (*Potentially Acid Forming*) dan FABAs (*Fly Ash & Bottom Ash*) sebagai material material penutup batuan yang mengandung pirit. Untuk mengetahui pengaruh oksigen dalam pembentukan air asam tambang, terdapat 2 perlakuan yang berbeda untuk masing-masing skenario, aerasi dan non-aerasi. Perlakuan aerasi dilakukan dengan cara menginjeksikan oksigen kedalam tabung menggunakan aerator. Skenario pelapisan uji FDCL dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Skenario Pelapisan Tabung Uji FDCL

Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan kualitas air lindian dari tabung yang diberi perlakuan aerasi dan tidak di masing-masing skenario, dimana pada skenario 1 tabung A akan dibandingkan dengan tabung D, pada skenario 2 tabung B akan dibandingkan dengan tabung E, dan pada skenario 3 tabung C akan dibandingkan dengan tabung F. Dalam uji FDCL ini diberlakukan siklus basah-kering harian, dimana siklus basah dilakukan dengan cara menyiramkan air destilat ke permukaan sampel yang berada di dalam reaktor, sedangkan siklus kering dilakukan dengan memasang lampu yang memberikan efek panas diatas reaktor selama 8 jam setiap harinya.

2.4 Analisis Data

Analisa dilakukan secara statistik dengan uji komparasi menggunakan uji T sampel independen (*independent sample T-test*) dan uji beda *Mann Whitney* menggunakan aplikasi IBM SPSS V.20. Kedua uji tersebut bertujuan untuk menentukan ada atau tidaknya perbedaan nilai/konsentrasi dari suatu parameter yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi. Uji T sampel independen merupakan bagian dari statistik inferensial parametrik (uji beda/perbandingan). Beberapa

syarat yang perlu dipenuhi untuk dapat diaplikasikannya uji T sampel independen adalah sebagai berikut:

1. Data berdistribusi normal.
2. Data bersifat homogen (tidak mutlak).
2. Kedua kelompok data bersifat independen (bebas).
4. Variabel yang dihubungkan berbentuk numerik dan kategorik (dengan hanya 2 kelompok data).

Jika kedua data tidak memenuhi syarat untuk dapat diuji menggunakan uji T sampel independen, maka uji yang digunakan adalah uji beda *Mann Whitney*. Uji beda *Mann Whitney* ini termasuk kedalam bagian dari statistik non-parametrik, sehingga tidak terdapat syarat-syarat tertentu untuk bisa mengaplikasikannya. Dalam penelitian ini, terdapat dua hipotesa umum yang digunakan untuk seluruh skenario dan parameter yang diuji. Hipotesa umum yang digunakan adalah:

1. H_0 : Tidak ada perbedaan nilai/konsentrasi (parameter) yang signifikan (nyata) antara tabung yang tidak diaerasi dan tabung yang diaerasi.
2. H_a : Ada perbedaan nilai/konsentrasi (parameter) yang signifikan (nyata) antara tabung yang tidak diaerasi dan tabung yang diaerasi.

Pengambilan keputusan didasarkan pada interpretasi hasil uji menggunakan aplikasi IBM SPSS V.20. Dasar pengambilan keputusan dari hasil uji statistik yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Jika nilai signifikansi (Sig.) atau signifikansi asimtotik (Assymp.Sig.) $> 0,05$, maka H_0 diterima dan H_a ditolak. Artinya, tidak ada perbedaan nilai/konsentrasi (parameter) yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi.
2. Jika nilai signifikansi (Sig.) atau signifikansi asimtotik (Assymp.Sig.) $< 0,05$, maka H_0 ditolak dan H_a diterima. Artinya, ada perbedaan nilai/konsentrasi (parameter) yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

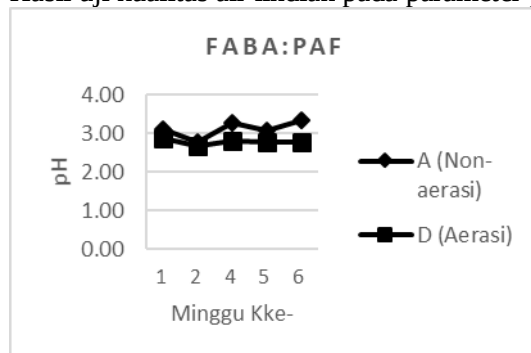
3.1 Analisis Mineralogi

Berdasarkan hasil uji XRD dan XRF yang dilakukan oleh Nugraha dkk., (2020), didapatkan bahwa sampel *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) dengan kandungan mineral Ca berturut-turut sebesar 34,5% dan 30%. Dengan kandungan Ca yang tinggi, kedua material tersebut dapat membantu proses netralisasi potensi asam. Maka dari itu, sampel FA dan BA ini termasuk kedalam material *non-acid forming* (NAF). Sedangkan untuk sampel pirit (PAF), terdeteksi kandungan S yang tinggi yaitu sebesar 8,62%. S pada batuan pirit ini berkorelasi dengan mineral pirit (FeS_2) yang merupakan salah satu komponen utama dalam proses pembentukan air asam tambang. Maka dari itu, sampel batuan pirit termasuk kedalam material *potentially acid forming* (PAF).

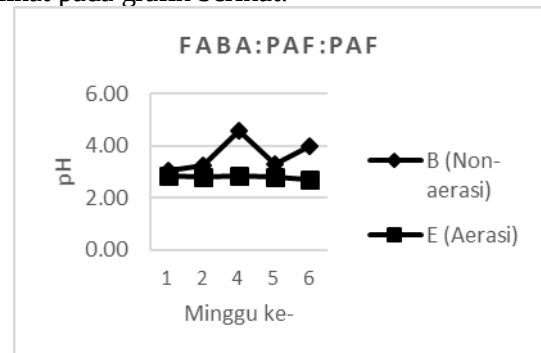
3.2 Kualitas Air Lindian

3.2.1 Parameter pH

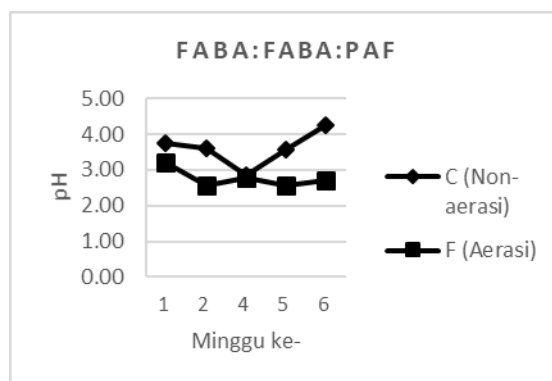
Hasil uji kualitas air lindian pada parameter pH dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 3. Nilai pH Skenario 1

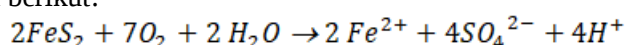


Gambar 4. Nilai pH Skenario 2



Gambar 5. Nilai pH Skenario 3

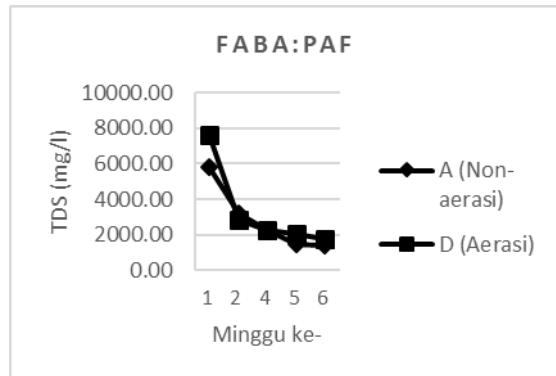
Nilai pH yang dihasilkan tabung pada ketiga skenario lapisan menunjukan nilai yang rendah atau asam (<7). Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh reaksi oksidasi pirit oleh oksigen yang terjadi sebagaimana dijelaskan pada reaksi berikut:



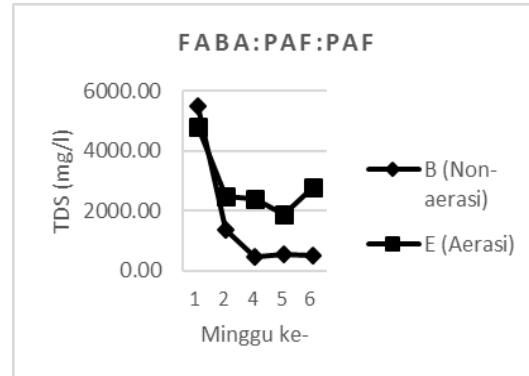
Dari persamaan reaksi tersebut dapat diketahui bahwa produk dari oksidasi pirit oleh oksigen adalah ion ferro (Fe^{2+}), sulfat (SO_4^{2-}) dan ion hidrogen (H^+). Maka dari itu, rendahnya nilai pH air lindian disebabkan oleh ion hidrogen yang dihasilkan. Berdasarkan grafik secara keseluruhan, nilai pH air lindian yang berasal dari tabung yang diberi perlakuan aerasi selalu lebih rendah daripada tabung yang tidak diberi perlakuan aerasi. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen yang diinjeksikan kedalam tabung. Meningkatnya konsentrasi oksigen akan mempercepat laju oksidasi, dimana konsentrasi dan transport oksigen di dalam air mempengaruhi reaktivitas pirit.

3.2.2 Parameter TDS

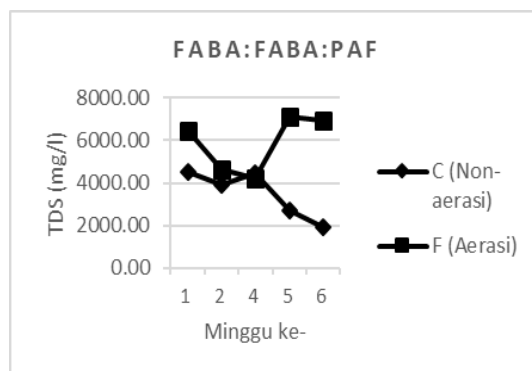
Hasil uji kualitas air lindian pada parameter TDS dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 6. Nilai TDS Skenario 1



Gambar 7. Nilai TDS Skenario 2

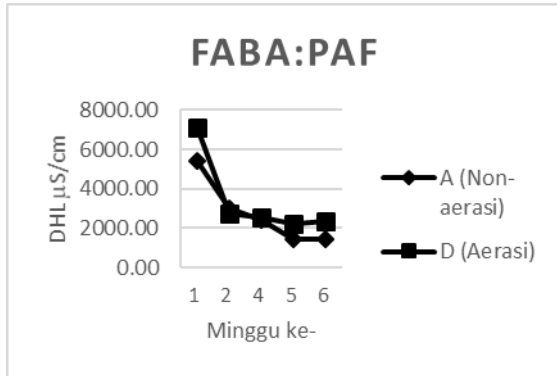


Gambar 8. Nilai TDS Skenario 3

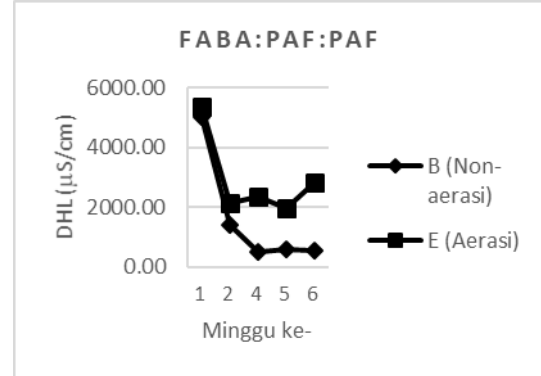
Berdasarkan grafik secara keseluruhan, nilai TDS pada tabung yang tidak diaerasi cenderung lebih kecil daripada tabung yang diaerasi. Hal tersebut berkaitan dengan oksigen yang diinjeksikan ke dalam tabung, dimana hadirnya oksigen yang lebih banyak pada tabung yang diaerasi akan mempercepat terjadinya reaksi oksidasi pirit oleh oksigen yang menghasilkan ion-ion terlarut yaitu ion ferro (Fe^{2+}), ion sulfat (SO_4^{2-}), dan ion hidrogen (H^+) yang dapat meningkatkan nilai TDS.

3.2.3 Parameter DHL

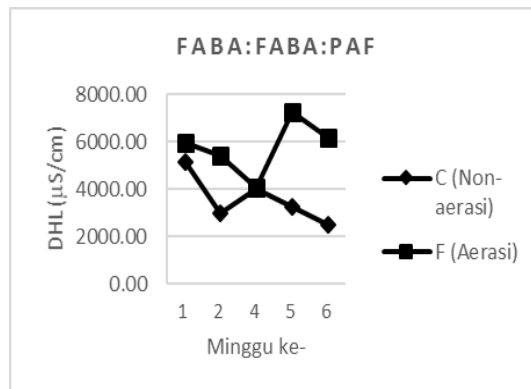
Hasil uji kualitas air lindian pada parameter DHL dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 9. Nilai DHL Skenario 1



Gambar 10. Nilai DHL Skenario 2

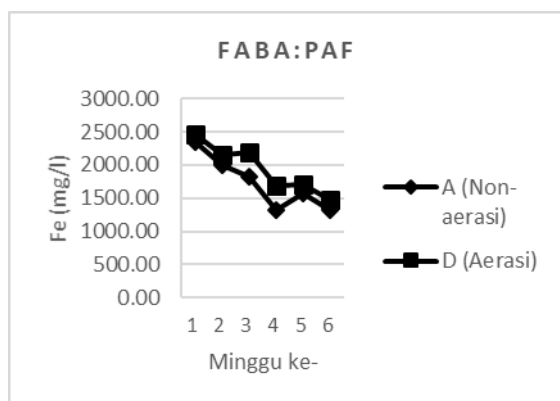


Gambar 11. Nilai DHL Skenario 3

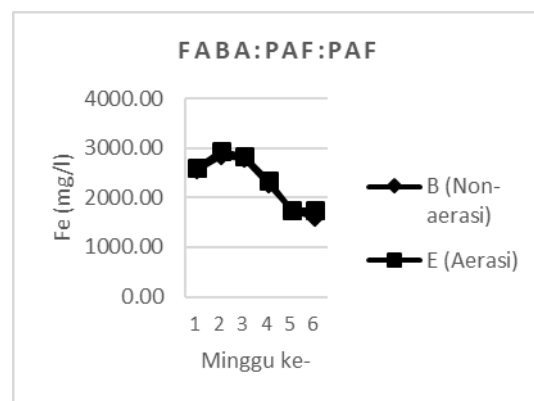
Nilai DHL mempengaruhi nilai TDS karena semakin banyak ion-ion yang terlarut maka semakin tinggi nilai TDS nya. Berdasarkan grafik secara keseluruhan, nilai DHL untuk air lindian yang dihasilkan dari tabung yang tidak diaerasi cenderung lebih kecil dibandingkan dengan tabung yang diaerasi. Hal tersebut merupakan pengaruh dari oksigen yang diinjeksikan ke dalam tabung, sehingga oksigen sebagai salah satu komponen pembentuk air asam tambang akan bereaksi dengan mineral pirit dan menghasilkan produk berupa ion-ion terlarut yang akan mempengaruhi nilai DHL.

3.2.4 Parameter Besi Total

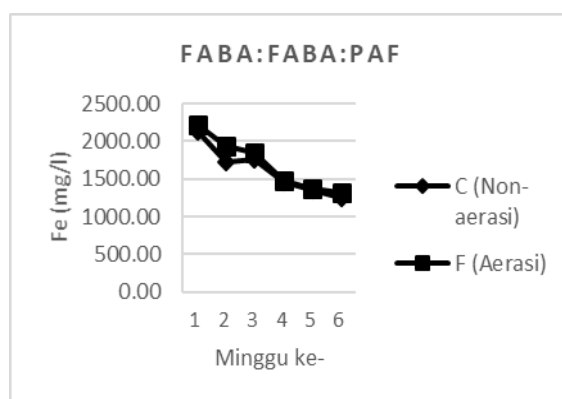
Hasil uji kualitas air lindian pada parameter besi total dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 12. Kandungan Besi (Fe) Skenario 1



Gambar 13. Kandungan Besi (Fe) Skenario 2

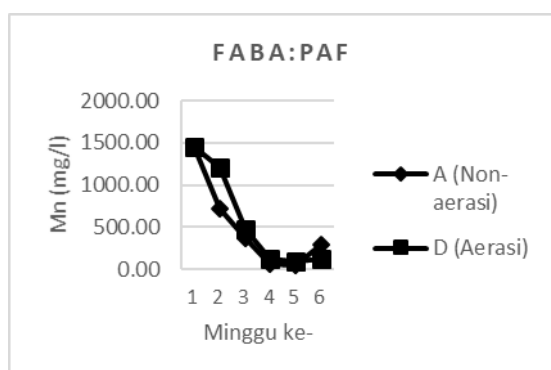


Gambar 14. Kandungan Besi (Fe) Skenario 3

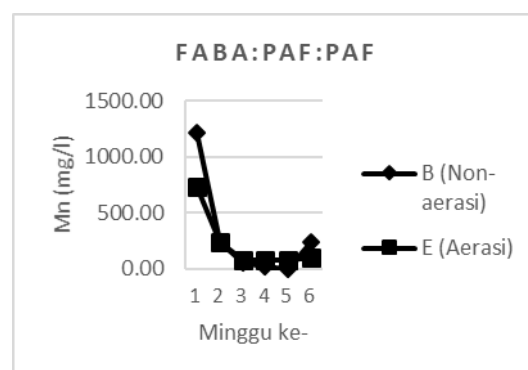
Berdasarkan grafik secara keseluruhan, tabung yang diinjeksi oksigen memiliki nilai yang selalu lebih besar dibandingkan dengan tabung yang tidak diinjeksi oksigen. Hal tersebut berkaitan dengan oksigen yang diinjeksikan ke dalam tabung, dimana hadirnya oksigen yang lebih banyak pada tabung yang diaerasi akan mempercepat terjadinya reaksi oksidasi pirit oleh oksigen yang menghasilkan ion ferro (Fe^{2+}). Lebih tingginya nilai Fe pada tabung yang diaerasi juga berkaitan dengan nilai pHnya, dimana reaksi oksidasi pirit dengan oksigen menghasilkan ion hidrogen yang menyebabkan keasaman. Sehingga jika dilihat dari data rata-rata pH, tabung yang diaerasi memiliki nilai pH yang lebih rendah dan air menjadi lebih mudah melarutkan logam.

3.2.5 Parameter Mangan

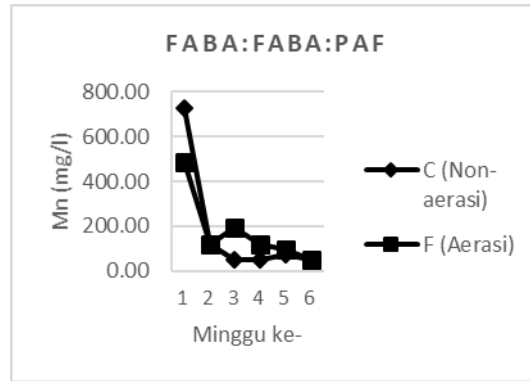
Hasil uji kualitas air lindian pada parameter mangan dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 15. Kandungan Mangan Skenario 1



Gambar 16. Kandungan Mangan Skenario 2

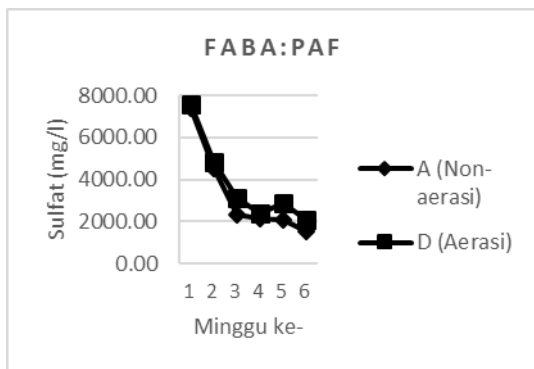


Gambar 17. Kandungan Mangan (Mn) Skenario 3

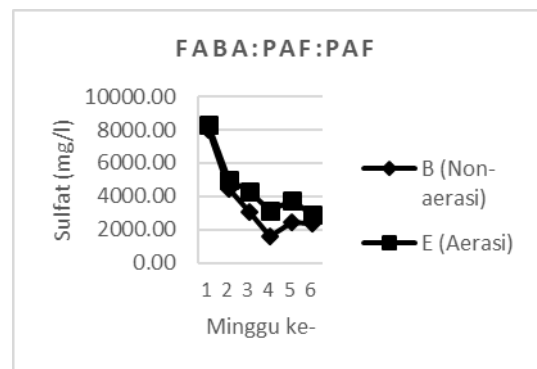
Berdasarkan grafik secara keseluruhan, nilai mangan di tabung yang diberi perlakuan aerasi cenderung lebih besar dibandingkan dengan tabung yang tidak diberi perlakuan aerasi. Hal ini berkaitan dengan kehadiran oksigen sebagai salah satu komponen pembentuk air asam tambang, dimana semakin banyak oksigen yang kontak dengan mineral pirit dan air maka akan mempercepat laju oksidasi sehingga nilai mangan di tabung yang diaerasi lebih tinggi. Salah satu hasil dari reaksi oksidasi pirit oleh oksigen adalah ion hidrogen (H^+) yang dapat menyebabkan keasaman sehingga logam lebih mudah larut.

3.2.6 Parameter Sulfat

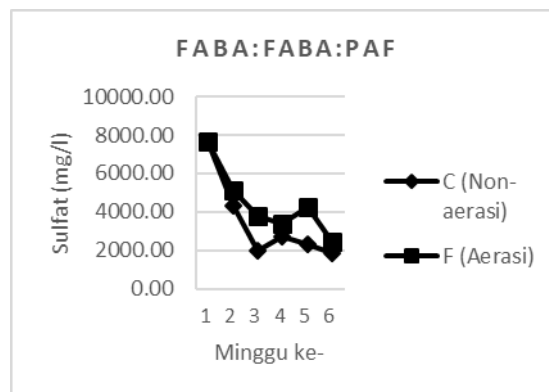
Hasil uji kualitas air lindian pada parameter sulfat dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 18. Kandungan Sulfat Skenario 1



Gambar 19. Kandungan Sulfat Skenario 2



Gambar 20. Kandungan Sulfat (SO₄²⁻) Skenario 3

Berdasarkan grafik secara keseluruhan, tabung yang diberi perlakuan aerasi menghasilkan air lindian dengan rata-rata kandungan sulfat yang lebih tinggi dibandingkan dengan tabung yang tidak diaerasi. Hal tersebut dapat disebabkan oleh kandungan oksigen yang lebih banyak pada tabung, dimana oksigen berperan sebagai oksidator pirit. Hal ini berkaitan dengan reaksi oksidasi pirit oleh oksigen yang terjadi dimana reaksi tersebut akan menghasilkan produk salah satunya yaitu sulfat.

3.3 Analisa Statistik

3.3.1 Parameter pH

Berdasarkan hasil uji normalitas dan homogenitas dari data pH, dapat diketahui bahwa skenario 1 dan 3 menghasilkan data yang berdistribusi normal dan bersifat homogen. Sedangkan skenario 2 menghasilkan data berdistribusi normal namun tidak homogen. Karena syarat mutlak dilakukannya uji T sampel independen hanyalah data yang berdistribusi normal, maka uji T sampel independen dapat dilakukan untuk ketiga skenario.

a. Skenario 1

Hasil analisis uji statistika parameter pH pada skenario 1 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Uji T Sampel independen Skenario 1 (pH)

Skenario 1	
t hitung	3,262
df	8
t tabel	2,30600
sig (P value)	0,011

Berdasarkan **tabel 2.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,011. Karena nilai sig. $0,011 < 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 ditolak dan H_a diterima. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa ada perbedaan nilai pH yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 1.

b. Skenario 2

Hasil analisis uji statistika parameter pH pada skenario 2 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Uji T Sampel independen Skenario 2 (pH)

Skenario 2	
t hitung	2,882
df	4,053
t tabel	2,77645
sig (P value)	0,044

Berdasarkan **tabel 3.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 2 yaitu sebesar 0,044. Karena nilai sig. $0,044 < 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 ditolak dan H_a diterima. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa ada perbedaan nilai pH yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 2.

c. Skenario 3

Hasil analisis uji statistika parameter pH pada skenario 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Uji T Sampel independen Skenario 3 (pH)

Skenario 3	
t hitung	3,353
df	8
t tabel	2,30600
sig (P value)	0,01

Berdasarkan **tabel 4.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 3 yaitu sebesar 0,010. Karena nilai sig. $0,010 < 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 ditolak dan H_a diterima. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa ada perbedaan nilai pH yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3.

3.3.1 Parameter TDS

Berdasarkan hasil uji normalitas dan homogenitas dari data TDS, dapat diketahui bahwa skenario 1 dan 2 menghasilkan data yang homogen namun tidak berdistribusi normal, sehingga tidak memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen. Maka dari itu, untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan nilai TDS yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dengan tabung yang diaerasi pada skenario 1 dan 2 digunakan uji beda *Mann Whitney*. Sedangkan data pada skenario 3 data berdistribusi normal dan homogen, sehingga memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen.

a. Skenario 1

Hasil analisis uji statistika parameter TDS pada skenario 1 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Uji Beda Mann Whitney Skenario 1 (TDS)

Skenario 1	
<i>Mann Whitney U</i>	10,000
<i>assymp. sig</i>	0,602

Berdasarkan **tabel 5.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,602. Karena nilai *assymp sig.* $0,602 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan nilai TDS yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 1.

b. Skenario 2

Hasil analisis uji statistika parameter TDS pada skenario 2 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Uji Beda Mann Whitney Skenario 2 (TDS)

Skenario 2	
<i>Mann Whitney U</i>	5,000
<i>assymp. sig</i>	0,117

Berdasarkan **tabel 6.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 2 yaitu sebesar 0,117. Karena nilai *assymp sig.* $0,117 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan nilai TDS yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 2.

c. Skenario 3

Hasil analisis uji statistika parameter TDS pada skenario 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 7. Hasil Uji T Sampel independen Skenario 3 (TDS)

Skenario 3	
<i>t hitung</i>	-3
<i>df</i>	8
<i>t tabel</i>	2,30600
<i>sig (P value)</i>	0,017

Berdasarkan **tabel 7.** Didapatkan bahwa nilai signifikansi (*sig*) atau *P value* untuk skenario 3 yaitu sebesar 0,017. Karena nilai *sig.* $0,017 < 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 ditolak dan H_a diterima. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa ada perbedaan nilai TDS yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3.

3.3.3 Parameter DHL

Berdasarkan hasil uji normalitas dan homogenitas dari data DHL, dapat diketahui bahwa skenario 1 dan 2 menghasilkan data yang homogen namun tidak berdistribusi normal, sehingga tidak memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen. Maka dari itu, untuk mengetahui ada atau

tidaknya perbedaan nilai DHL yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dengan tabung yang diaerasi pada skenario 1 dan 2 digunakan uji beda *Mann Whitney*. Sedangkan data pada skenario 3 berdistribusi normal dan homogen, sehingga memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen.

a. Skenario 1

Hasil analisis uji statistika parameter DHL pada skenario 1 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 8. Hasil Uji Beda *Mann Whitney* Skenario 1 (DHL)

Skenario 1	
<i>Mann Whitney U</i>	10,000
<i>assymp. sig</i>	0,602

Berdasarkan **tabel 8.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,602. Karena nilai sig. $0,602 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan nilai DHL yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 1.

b. Skenario 2

Hasil analisis uji statistika parameter DHL pada skenario 2 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil Uji Beda *Mann Whitney* Skenario 2 (DHL)

Skenario 2	
<i>Mann Whitney U</i>	4,000
<i>assymp. sig</i>	0,076

Berdasarkan **tabel 9.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 2 yaitu sebesar 0,076. Karena nilai sig. $0,076 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan nilai DHL yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 2.

c. Skenario 3

Hasil analisis uji statistika parameter DHL pada skenario 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 10. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 3 (DHL)

Skenario 3	
t hitung	-3,136
df	8
t tabel	2,30600
sig (P value)	0,014

Berdasarkan **tabel 10.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 3 yaitu sebesar 0,014. Karena nilai sig. $0,014 < 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 ditolak dan H_a diterima. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa ada perbedaan nilai DHL yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3.

3.3.4 Parameter Besi Total

Berdasarkan hasil uji normalitas dan homogenitas dari data besi total, dapat diketahui bahwa ketiga skenario menghasilkan data yang berdistribusi normal dan bersifat homogen. Maka dari itu, seluruh data memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen yang bertujuan untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan konsentrasi besi yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dengan tabung yang diaerasi pada masing-masing skenario.

a. Skenario 1

Hasil analisis uji statistika parameter besi total pada skenario 1 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 11. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 1 (Besi Total)

Skenario 1	
t hitung	-0,967
df	10
t tabel	2,2281
sig (P value)	0,357

Berdasarkan **tabel 11.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,357. Karena nilai sig. $0,357 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi besi yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 1.

b. Skenario 2

Hasil analisis uji statistika parameter besi total pada skenario 2 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 12. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 2 (Besi Total)

Skenario 2	
t hitung	-0,224
df	10
t tabel	2,2281
sig (P value)	0,828

Berdasarkan **tabel 12.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,828. Karena nilai sig. $0,828 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi besi yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 2.

c. Skenario 3

Hasil analisis uji statistika parameter besi total pada skenario 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 13. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 3 (Besi Total)

Skenario 3	
t hitung	-0,423
df	10
t tabel	2,2281
sig (P value)	0,681

Berdasarkan **tabel 13.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,681. Karena nilai sig. $0,681 > 0,05$, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi besi yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3.

3.3.5 Parameter Mangan

Berdasarkan hasil uji normalitas dan homogenitas dari data mangan, dapat diketahui bahwa skenario 1 yang menghasilkan data berdistribusi normal dan homogen. Maka dari itu, uji T sampel independen hanya dapat dilakukan untuk data pada skenario 1. Sedangkan untuk skenario 2 dan 3, data yang dihasilkan homogen namun tidak berdistribusi normal sehingga tidak memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen. Maka dari itu, untuk menentukan ada atau tidaknya perbedaan

konsentrasi mangan yang signifikan dari tabung yang tidak di aerasi dan di aerasi pada skenario 2 dan 3 dilakukan dengan uji beda *Mann Whitney*.

a. Skenario 1

Hasil analisis uji statistika parameter mangan pada skenario 1 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 14. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 1 (Mangan)

Skenario 1	
t hitung	-0,271
df	10
t tabel	2,2281
sig (P value)	0,792

Berdasarkan **tabel 14.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 1 yaitu sebesar 0,792. Karena nilai sig. 0,792 > 0,05, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi mangan yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 1.

b. Skenario 2

Hasil analisis uji statistika parameter mangan pada skenario 2 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 15. Hasil Uji Beda Mann Whitney Skenario 2 (Mangan)

Skenario 2	
Mann Whitney U	15,000
assymp. sig	0,626

Berdasarkan **tabel 15.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 2 yaitu sebesar 0,626. Karena nilai sig. 0,626 > 0,05, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi mangan yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 2.

c. Skenario 3

Hasil analisis uji statistika parameter mangan pada skenario 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 16. Hasil Uji Beda Mann Whitney Skenario 3 (Mangan)

Skenario 3	
Mann Whitney U	11,500
assymp. sig	0,286

Berdasarkan **tabel 16.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 3 yaitu sebesar 0,286. Karena nilai sig. 0,286 > 0,05, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi mangan yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3.

3.3.6 Parameter Sulfat

Berdasarkan hasil uji normalitas dan homogenitas dari data sulfat, dapat diketahui bahwa skenario 1 dan 2 menghasilkan data yang berdistribusi normal dan homogen, sehingga memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen. Sedangkan untuk skenario 3, data yang dihasilkan homogen namun tidak berdistribusi normal, sehingga tidak memenuhi syarat untuk dapat dilakukan uji t sampel independen. Maka dari itu, untuk menentukan ada atau tidaknya perbedaan konsentrasi sulfat yang signifikan dari tabung yang tidak di aerasi dan di aerasi pada skenario 3 dilakukan dengan uji beda *Mann Whitney*.

a. Skenario 1

Hasil analisis uji statistika parameter sulfat pada skenario 1 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 17. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 1 (Sulfat)

Skenario 1	
t hitung	-0,382
df	10
t tabel	2,2281
sig (P value)	0,711

Berdasarkan **tabel 17.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 3 yaitu sebesar 0,711. Karena nilai sig. 0,711 > 0,05, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi sulfat yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 1.

b. Skenario 2

Hasil analisis uji statistika parameter sulfat pada skenario 2 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 18. Hasil Uji T Sampel Independen Skenario 2 (Sulfat)

Skenario 2	
t hitung	-0,722
df	10
t tabel	2,2281
sig (P value)	0,487

Berdasarkan **tabel 18.** didapatkan bahwa nilai signifikansi (sig) atau *P value* untuk skenario 2 yaitu sebesar 0,487. Karena nilai sig. 0,487 > 0,05, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi sulfat yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 2.

c. Skenario 3

Hasil analisis uji statistika parameter sulfat pada skenario 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 19. Hasil Uji Beda Mann Whitney Skenario 3 (Sulfat)

Skenario 3	
Mann Whitney U	10,000
assymp. sig	0,2

Berdasarkan **tabel 19.** didapatkan bahwa nilai signifikansi asimtotik (*assymp. sig*) untuk skenario 3 yaitu sebesar 0,2. Karena nilai sig. 0,2 > 0,05, dapat ditarik kesimpulan bahwa H_0 diterima dan H_a ditolak. Berdasarkan hasil uji tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak ada perbedaan konsentrasi sulfat yang signifikan antara tabung yang tidak diaerasi dan diaerasi pada skenario 3.

4. KESIMPULAN

Penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai material NAF dalam mencegah pembentukan air asam tambang belum efektif, karena nilai atau konsentrasi parameter pH, TDS, DHL, Fe, Mn, dan SO_4^{2-} dari air hasil uji pembentukan air asam tambang yang masih tergolong buruk. Jika dilihat berdasarkan grafik perbandingan air lindian dari tabung aerasi dan non-aerasi, keberadaan oksigen dapat menurunkan nilai pH serta meningkatkan nilai atau konsentrasi TDS, DHL, Fe, Mn, dan SO_4^{2-} . Namun secara statistik, keberadaan oksigen memiliki pengaruh yang signifikan (nyata) hanya terhadap parameter pH pada seluruh skenario pelapisan serta parameter TDS dan DHL pada skenario 3.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gautama, P. D. I. R. S. (2019). Pembentukan, Pengendalian, dan Pengelolaan Air Asam Tambang. Bandung: ITB Press.
- [2] Hamdani, A. H., dan Senjaya, Y. A. (2011). Geokimia Batuan Penutup (Overburden) Batubara untuk Memprediksi Potensi Air Asam Tambang di Pit 1 IUP PWR, di Daerah Kasai, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. *Kabupaten Barau, Kalimantan Timur Bulletin of Scientific Contribution IX*, 77-96.
- [3] Herlina, A., Handayani, H. E., dan Iskandar, H. (2014). Pengaruh Fly Ash dan Kapur Tohor pada Netralisasi Air Asam Tambang Terhadap Kualitas Air Asam Tambang (Ph, Fe & Mn) di Iup Tambang Air Laya Pt. Bukit Asam (Persero), Tbk. *Jurnal Ilmu Teknik*, 2(2).
- [4] Kurniawan, D. (2008). Uji t 2-Sampel Independen. *Jurnal Statistik*.
- [5] Nugraha, C., Sukandar, dan Pratama, Y. (2020). Characterization Study Of Coal-Combustion Ash For Acid Mine Drainage Prevention. Proceeding International Conference on Green Technology and Design 2020, Itenas Bandung, 2020