



ANALISIS PEMANFAATAN LIMBAH FLY ASH BATUBARA PT. PLN NUSANTARA POWER PULANG PISAU UNTUK PENETRALAN AIR ASAM TAMBANG

*Analysis Of Coal Fly Ash Waste Utilization Pt. Pln Nusantara Power Home Knife For Acid Mine
Water Neutralization*

Yulinda Br Surbakti¹, Fahrul Indraja^{2,3}, Saptawartono³

Universitas Palangka Raya, Indonesia

*Email: yulindasurbakti0502@gmail.com¹, fahrulindrajaya@mining.upr.ac.id²,
saptawartono@mining.upr.ac.id³,

*Correspondence: Yulinda Br Surbakti

DOI:

10.59141/comserva.v3i06.1022

ABSTRAK

Air asam tambang adalah air yang berasal dari aktivitas penambangan yang harus dikelola dengan baik sesuai aturan yang berlaku. Ada beberapa parameter yang ditetapkan untuk mengolah air asam tambang, yaitu pH, TSS dan logam berat lainnya. Pada penelitian ini hanya berfokus pada kenaikan pH air asam tambang (tidak menganalisis parameter yang lain). Bahan yang diperlukan untuk pengolahan pH AAT adalah bahan yang bersifat alkalin (bersifat basa kuat) sehingga dapat menaikkan pH air tambang. Tujuan penelitian ini adalah memanfaatkan fly ash PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau yang merupakan sisa pembakaran batubara dan bersifat limbah untuk menetralkan air asam tambang di PT. Bhumi Rantau Energi. Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah fly ash batubara yang bertipe C dengan metode pengadukan fly ash dengan AAT dan tanpa pengadukan fly ash dengan AAT. Penelitian ini menggunakan 2 (dua) metode pada uji jart test yaitu metode tanpa pengadukan fly ash dan metode dengan pengadukan fly ash. Setelah dilakukan percobaan terhadap metode tersebut maka didapatkan hasil bahwa yang paling efektif dalam menetralkan air asam tambang adalah metode dengan pengadukan karena reaksi-reaksi yang terjadi di AAT lebih cepat. Hasilnya, 0,07 gram fly ash dalam 200 mL AAT yang memiliki pH = 4 dapat naik menjadi pH = 6, 14. pH tersebut sudah layak untuk dialirkan ke badan sungai sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003.

Kata kunci: Air Asam Tambang, Fly ash, metode Pengadukan, Metode Tanpa Pengadukan

ABSTRACT.

Acid mine water is water derived from mining activities that must be managed properly according to applicable regulations. There are several parameters set for treating acid mine water, namely pH, TSS and other heavy metals. This study only focused on increasing the pH of acid mine water (not analyzing other parameters). The material needed for AAT pH processing is alkaline (strong alkaline) so that it can raise the pH of mine water. The purpose of this study is to utilize fly ash PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau which is the residue of coal combustion and is waste to neutralize acid mine water at PT. Bhumi Energy Region. In this study, the material used was type C coal fly ash with the fly ash stirring method with AAT and without stirring fly ash with AAT. This study uses 2 (two) methods in

the jar test, namely the method without stirring fly ash and the method with stirring fly ash. After experiments on this method, it was found that the most effective in neutralizing acid mine water was the method with stirring because the reactions that occurred in AAT were faster. As a result, 0.07 grams of fly ash in 200 mL AAT that has a pH = 4 can rise to pH = 6.14. The pH is suitable to flow into river bodies in accordance with the Decree of the State Minister of Environment No. 113 of 2003.

Keywords: Acid Mine Water, Fly ash, Stirring method, No Stirring Method

PENDAHULUAN

Air Asam Tambang (AAT) adalah air tambang dengan pH rendah yang berasal dari oksidasi pirit yang mengandung sulfida dengan air dan udara sehingga menghasilkan asam sulfida (H₂SO₄) yang mengandung sulfat bebas (Arifin et al., 2022) (Yuniar, 2020) (NISFI SYA'BANI, 2023). Air adalah penghambat utama pada perusahaan tambang yang sedang berproduksi. Air yang teroksidasi di wilayah kerja akan mengakibatkan timbulnya AAT (Fahrudin, 2018). Air Asam Tambang yang tidak diolah dengan baik oleh perusahaan akan berdampak negatif pada masyarakat yang mengkonsumsinya (baik untuk mencuci, air minum dan kegunaan lainnya) (Said et al., 2020).

PT. Bhumi Rantau Energi (PT. BRE) merupakan perusahaan batubara yang terletak di Kalimantan Selatan. Kalimantan selatan adalah provinsi ke 2 (dua) penghasil batubara terbesar di Indonesia. PT. Bhumi Rantau Energi dalam penambangan memakai metode strip mine, dimana batubara yang diambil akan menghasilkan void (lubang bekas tambang) sebelum dilakukan reklamasi tahap akhir (pengembalian tanah pucuk) (Fauzi, 2022) (Jiyah et al., 2017). PT. Bhumi Rantau Energi memiliki beberapa sump yang dialirkan langsung ke settling pond melalui zona inlet yang ada pada settling pond (Prasetya et al., 2021).

Hasil dari batubara PT. Bhumi Rantau Energi dipasok ke beberapa perusahaan dalam maupun luar negeri, salah satunya yaitu ke PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau. Dampak penggunaan batubara di PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau ini menghasilkan limbah fly ash (abu terbang) yang dihasilkan dari kapasitas pembangkit 2 x 1000 Watt adalah 400 Ton setiap harinya (Utami, 2018). Fly ash ini ditumpuk didalam area sekitar PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau, sehingga penumpukan ini menjadi polusi bagi lingkungan sekitar, walaupun limbah ada dipakai untuk pupuk petani food estate dan bahan konstruksi, tetapi belum mampu untuk memanfaatkan semua fly ash yang ada (Putra, 2017) (Syaefudin et al., 2020) (Yusmur et al., 2019) (Klarens et al., 2016). Fly ash yang bersifat alkalin dapat menetralkan air asam dengan kadar pH rendah menjadi lebih basa (netral) (Samosir & Rusli, 2021) (Herlina et al., 2014).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan limbah fly ash batubara dari PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau untuk menetralkan air asam tambang di PT. Bhumi Rantau Energi di Provinsi Kalimantan Selatan. Dan untuk manfaatnya mengurangi Polusi Lingkungan: Dengan memanfaatkan limbah fly ash, penelitian ini bertujuan untuk mengurangi dampak negatif polusi lingkungan yang dihasilkan oleh penimbunan fly ash di sekitar PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau, penanganan Air Asam Tambang: Pemanfaatan fly ash untuk menetralkan air asam tambang di PT. Bhumi Rantau Energi akan membantu mengatasi masalah air asam yang merupakan dampak dari kegiatan pertambangan batubara, optimalisasi Limbah: Penelitian ini berpotensi mengurangi penumpukan limbah fly ash dengan menggunakannya sebagai agen penetral air asam tambang, sehingga lebih banyak limbah fly ash yang dapat dimanfaatkan.

Dengan pemanfaatan limbah fly ash dari PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau, maka dapat mengurangi polusi lingkungan dengan mengatasi air asam tambang pada PT. Bhumi Rantau Energi. Inilah yang mendasari peneliti untuk melakukan penelitian dengan judul “Analisis Pemanfaatan Limbah Fly Ash Batubara PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau Untuk Penetralan Air Asam Tambang Pada PT. Bhumi Rantau Energi Provinsi Kalimantan Selatan”.

METODE

Penelitian ini menggunakan 2 metode pada pengambilan data yaitu metode observasi lapangan dan studi literatur. Observasi lapangan dilakukan secara langsung pada PT. Bhumi Rantau Energi yaitu melakukan percobaan jart test dengan metode pengadukan dan pengadukan fly ash. Metode studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan data-data dari perusahaan dan literatur lainnya. Metode pengolahan data ada 2 (dua) yaitu metode kuantitatif dan deskriptif. Metode kuantitatif dilakukan untuk mengetahui hasil percobaan melalui uji jart test dan hasil yang diperoleh disajikan dalam bentuk angka berupa diagram dan digambarkan dengan metode deskriptif dengan bahasa yang mudah dipahami dari hasil diagram tersebut untuk memahami hasil penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan pada PT. Bhumi Rantau Energi pada 2 (dua) *settling pond* yaitu *Settling Pond Crusher I* dan *Settling Pond Crusher II*. Sumber AAT pada *settling pond* ini berasal dari batubara yang ditimbun pada *stock ROM* yang terlalu lama dan terkontaminasi dengan udara serta reaksi dengan air dari aktifitas sekitar *stock ROM*.

A. Debit Air Tambang

Debit AAT yang masuk ke SP *Crusher I* dan SP *Crusher II* pada penelitian ini dilakukan dengan pengukuran secara langsung di lapangan dengan memakai metode *area velocity* dengan rumus :

$$Q = V \times A \times H$$

AAT dialirkan dari saluran terbuka tidak menggunakan pompa (*pumping*) ke kompartemen 1 (*inlet*) ke kompartemen selanjutnya dengan menggunakan gorong-gorong yang dipasang secara *zig-zag*. Berikut kondisi SP yang diambil dari foto udara menggunakan *drone*.



Gambar 1 SP Crusher I



Gambar 1 SP Crusher II

Untuk mendapatkan debit aliran yang masuk, pertama mengukur kecepatan aliran dan pengukuran jarak aliran dilewati pada saluran terbuka. Panjang lintasan aliran yang akan dilewati pada saluran yaitu 5,5 Meter yang diukur menggunakan dengan meteran.

Setelah mendapatkan kecepatan aliran selanjutnya mencari luas permukaan yang dilewati aliran. Mengukur luas penampang pada gorong-gorong yang dialiri oleh debit saluran dengan cara mencari diameter gorong-gorong. Gorong-gorong yang dipasang pada SP Crusher I dan SP Crusher II pada jalur saluran terbuka ke kompartemen 1 memiliki diameter yang sama yaitu 1,25 Meter.

Terakhir, mencari ketinggian aliran air asam tambang yang masuk ke SP Crusher I dan SP Crusher II melalui kompartemen I. Ketinggian air diambil pada mulut gorong-gorong dengan bantuan meteran. Pengukuran dilakukan dari dasar gorong-gorong sampai batas permukaan air dan dicatat hasil ketinggian aliran.



Gambar 3 Mengukur Kecepatan



Gambar 4 Mengukur Diameter



Gambar 2 Mengukur Ketinggian

Setelah mendapatkan kecepatan aliran, luas penampang yang dilewati aliran dan ketinggian aliran air asam tambang maka dilakukan perhitungan debit aliran yang masuk ke *settling pond Crusher I* dan *settling pond Crusher II* dengan rumus pada metode *area velocity*. Peneliti melakukan pengambilan debit air dilakukan bersamaan pengambilan sampel AAT pada *settling pond Crusher I* dan *settling pond Crusher II*. Maka didapatkan hasil debit yang masuk ke SP Crusher I dan SP Crusher II. (Lihat Tabel 1.1 dan Tabel 1.2)

Tabel 1 Debit AAT di SP Crusher I

Tanggal	Jarak (m)	Waktu (s)	Kecepatan (m/s)	Diameter Gorong(m)	Luas Lingkaran (m ²)	Ketinggian AAT (m)	Debit (m ³ /s)
---------	-----------	-----------	-----------------	--------------------	----------------------------------	--------------------	---------------------------

Yulinda Br Surbakti¹, Fahrul Indrajaya², Saptawartono³

Analysis Of Coal Fly Ash Waste Utilization Pt. Pln Nusantara Power Home Knife For Acid Mine Water Neutralization

1 Juni 2023	5,5	126,6	0,0434	1,25	0,39	0,45	0,00764
2 Juni 2023	5,5	140,4	0,0392	1,25	0,39	0,51	0,00780
3 Juni 2023	5,5	147,6	0,0373	1,25	0,39	0,55	0,00801
4 Juni 2023	5,5	140	0,0393	1,25	0,39	0,41	0,00629
5 Juni 2023	5,5	140	0,0393	1,25	0,39	0,42	0,00645
6 Juni 2023	5,5	142	0,0387	1,25	0,39	0,43	0,00651
7 Juni 2023	5,5	147,6	0,0373	1,25	0,39	0,55	0,00801
Rata rata	5,5	140,6	0,0392	1,25	0,39	0,47	0,00724

Tabel 2 Debit AAT di SP Crusher II

Tanggal	Jarak (m)	Waktu (s)	Kecepatan (m/s)	Diameter Gorong (m)	Luas Lingkaran (m ²)	Ketinggian AAT (m)	Debit (m ³ /s)
1 Juni 2023	5,5	307,2	0,0179	1,25	0,39	0,042	0,00029
2 Juni 2023	5,5	321	0,0171	1,25	0,39	0,045	0,00030
3 Juni 2023	5,5	312,6	0,0176	1,25	0,39	0,046	0,00032
4 Juni 2023	5,5	340	0,0162	1,25	0,39	0,038	0,00024
5 Juni 2023	5,5	340	0,0162	1,25	0,39	0,04	0,00025
6 Juni 2023	5,5	342	0,0161	1,25	0,39	0,041	0,00026
7 Juni 2023	5,5	360	0,0153	1,25	0,39	0,043	0,00026
Rata-rata	5,5	331,83	0,0166	1,25	0,39	0,042	0,00027

B. Karakteristik Air Asam Tambang

Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan atau Kegiatan Penambangan Batubara Pasal 2 ayat 1 baku mutu air limbah pertambangan.

Tabel 3 Baku Mutu Air

Parameter	Kadar Maksimum	Satuan
pH	6-9	
Residu Tersuspensi (TSS)	400	Mg/l
Besi (Fe) Total	7	Mg/l
Mangan (Mn) Total	4	Mg/l

Sumber: Bella Puspa, 2016

Air asam tambang pada SP *Crusher* I dan SP *Crusher* II memiliki karakteristik AAT yang sama karena berasal dari oksidasi mineral sulfida pada batubara yang ditimbun pada *stock* ROM PT. Bhumi Rantau Energi. Pada saat hujan maka akan terjadi reaksi pembentukan AAT pada batubara yang ditimbun teroksidasi dengan oksigen.



Gambar 6 Pengambilan Sampel AAT oleh DLH Kab.Tapin

Tipe AAT menurut Skousen, 1996 dalam Georgius, 2021 ada 5 tipe, AAT SP *Crusher* I dan SP *Crusher* II memiliki karakteristik tipe 1 (satu) untuk pH < 4,5 tetapi untuk logam berat (Fe, Mn dan Cd) tidak sesuai dengan tipe 1 karena logam berat pada air tambang PT. Bhumi Rantau Energi tidak bermasalah dibuktikan dengan hasil laboratorium yang dilakukan pada Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Tapin.

Tabel 4 Baku Mutu Air dan Hasil Lab DLH Kab. Tapin

Baku Mutu Air	Hasil Pengujian Laboratorium	Batas Maksimum	Satuan
pH	4, 17	6 -- 9	
<i>Total Suspended Solid (TSS)</i>	5.163	200	mg/L
Besi (Fe)	0,115	7	mg/L
Mangan (Mn)	0,103	4	mg/L
Kadmium (Cd)	< 0,0106	0,05	mg/L

Jika diperhatikan hasil laboratorium oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Tapin maka untuk *settling pond* memiliki pH yang asam (<4,5). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang sudah

dilakukan peneliti, bahwa pH dari SP *Crusher* I dan SP *Crusher* II memiliki pH sesuai jenis AAT tipe 1 (satu).

C. Kandungan *Fly Ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau dan Reaksi Kimia dengan AAT

Setelah dikeluarkannya *fly ash* dari limbah B3 pada Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, *fly ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau diberikan secara gratis kepada masyarakat dan dijual Rp. 30.000/kilogram kepada pihak perusahaan yang akan membeli *fly ash* untuk keperluan tertentu untuk menghindari penumpukan *fly ash*. *Fly ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau diolah olah masyarakat menjadi bahan campuran pembuatan *paving block* dan perusahaan mengolah untuk pupuk tanaman pada perusahaan perkebunan sawit.



Gambar 7 PLTU Pulang Pisau

Fly ash batubara PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau yang dihasilkan dari kapasitas pembangkit 2 x 1000 watt adalah 400 ton *fly ash* setiap harinya. *Fly ash* ini ditumpuk didalam area sekitar PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau. Pemeriksaan kandungan dilakukan pada departemen lingkungan PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau melalui laboratorium PT. Sucofindo Banjarmasin setiap satu bulan sekali.



Gambar 8 *Fly Ash* PLTU Pulang Pisau

Setelah dilakukan pengambilan *fly ash* maka dilakukan uji sampel terhadap *fly ash* skala laboratorium di Sucofindo Departemen Comersial 3 Mineral and *Coal Testing* Banjarmasin terhadap sampel *fly ash* sebanyak 2 plastik sehingga didapatkan kandungan *fly ash* sebagai berikut:

Tabel 5 Hasil Laboratorium Kandungan *Fly Ash*
Kandungan *Fly Ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau Berdasarkan Uji Laboratorium

No	Rumus Kimia	Nama Senyawa	Nilai (%)
1	SiO ₂	Silika Oksida	38.59
2	Al ₂ O ₃	Aluminium Oksida	10.16
3	Fe ₂ O ₃	Besi (II) Oksida	19.98
4	CaO	Kalsium Oksida	16.51
5	MgO	Magnesium Oksida	9.06
6	NA ₂ O	Natrium Oksida	0.42
7	K ₂ O	Kalium Oksida	0.87

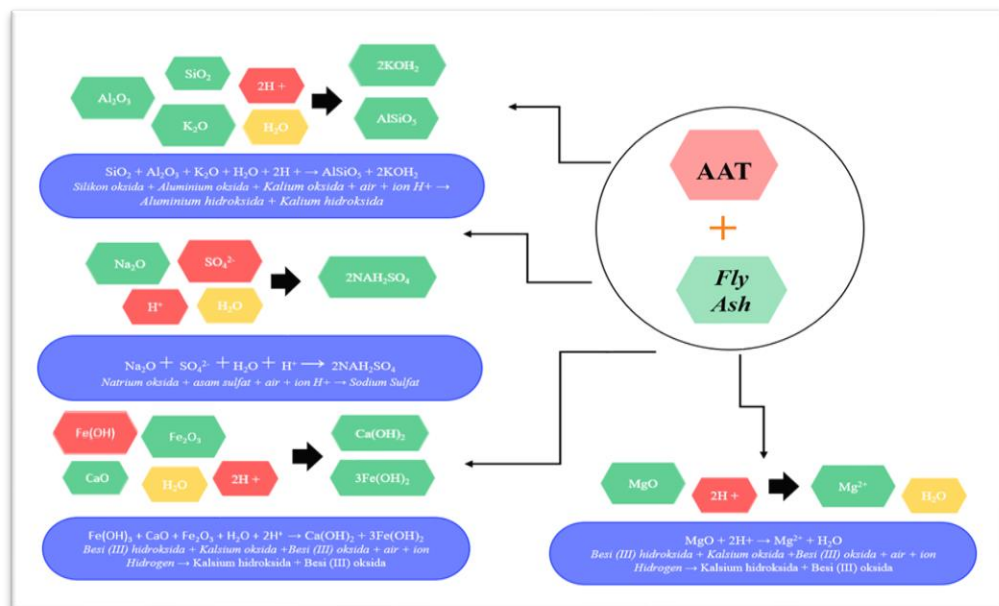
Pada tabel periodik unsur dapat dilihat kandungan dari *fly ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau dan karakteristik dari masing-masing senyawa pembentuk *fly ash* yang dihasilkan.

TABEL PERIODIK UNSUR																	
KANDUNGAN UNSUR FLY ASH PT. PLN NUSANTARA POWER PULANG PISAU																	
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

Merah	Alkali Tanah	Biru	Logam Tanah Jarang
Kuning	Logam Alkali Tanah	Merah Muda	Paramagnetik
Hijau	Logam Transisi	Jingga	Pengoksidasi

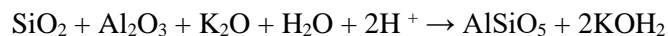
Gambar 9 Tabel Periodik Unsur Pembentuk *Fly Ash*

Dalam Gautama, 2012 dalam bukunya bahwa ada 3 reaksi yang terjadi pada AAT dan *fly ash* yaitu reaksi air asam tambang dengan mineral silika, karbonat dan pertukaran ion. Dari kandungan senyawa yang ada pada *fly ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau maka reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.



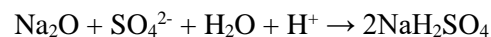
Gambar 10 Reaksi Kimia Fly Ash dengan AAT

- 1) Reaksi AAT dengan Mineral Silika Fly Ash Batubara PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau



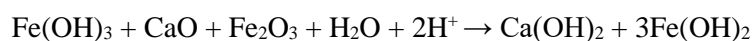
Silikon oksida + Aluminium oksida + Kalium oksida + air + ion H⁺ → Aluminium hidroksida + Kalium hidroksida

Selain reaksi dengan mineral silika diatas, air asam tambang juga bereaksi dengan natrium oksida



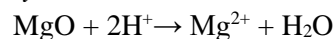
Natrium oksida + asam sulfat + air + ion H⁺ → Sodium Sulfat

- 2) Reaksi AAT dengan Mineral Karbonat Fly Ash Batubara PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau



Besi (III) hidroksida + Kalsium oksida + Besi (III) oksida + air + ion Hidrogen → Kalsium hidroksida + Besi (III) oksida

- 3) Reaksi AAT dengan Pertukaran Ion Fly Ash Batubara PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau



Magnesium oksida + Ion Hidrogen → Kation Magnesium + air

D. Perhitungan Kebutuhan Fly Ash untuk Penetralan AAT

Metode pengolahan yang digunakan pada PT. Bhumi Rantau Energi adalah metode pengolahan aktif yaitu metode yang dibantu secara langsung oleh manusia (*human*). Penelitian ini menggunakan uji *jar test* dengan 2 (dua) metode, yaitu uji *jar test* dengan pengadukan *fly ash* dan uji *jar test* tanpa pengadukan *fly ash*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui komposisi efektif dari *fly ash* untuk

menetralkan AAT di SP *Crusher* I dan SP *Crusher* II. Berikut tahapan *jar test* yang dilakukan pada Penelitian ini.



Gambar 11 Tahapan Jar Test Tanpa Pengadukan



Gambar 12 Tahapan Jar Test Dengan Pengadukan

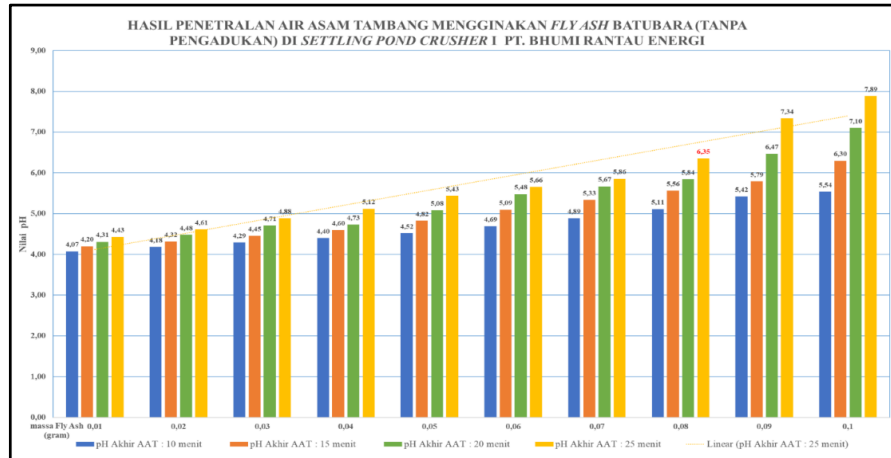
Pengambilan data di lapangan dilakukan selama 7 (tujuh) hari pada 01-07 Juni 2023. Percobaan dilakukan sebanyak 7 (tujuh) kali pengulangan untuk 2 (dua) metode yang dilakukan pada penelitian ini (tanpa pengadukan dan dengan pengadukan) untuk mendapatkan hasil yang akurasinya tinggi. Setelah mengolah data didapatkan rata-rata hasil percobaan sebagai berikut.

1) Penetralkan AAT Menggunakan *Fly Ash* metode Tanpa Pengadukan di SP *Crusher* I

Tabel 6 Hasil Penetralkan AAT *Crusher* I (Tanpa Pengadukan)

No	Volume Sampel AAT (ml)	Debit				massa <i>Fly ash</i> (gram)	pH Awal AAT	pH <i>Fly Ash</i> - AAT (Tanpa Pengadukan)					gr/ml	gr/m ³	gr/det	Kebutuhan <i>Fly Ash</i>								
		m ³ /detik	m ³ /jam	m ³ /hari	m ³ /bulan			10 menit	15 menit	20 menit	25 menit	gr/jam				Kg/jam	Ton/jam	gr/hari	Kg/hari	Ton/hari	gr/bulan	Kg/bulan	Ton/bulan	
1	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,01	4,01	4,07	4,20	4,31	4,43	0,00005	90,00	0,36	1.305,26	1,31	0,001802627	31326,17	31,33	0,03	93978,14	939,79	0,94	
2	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,02	4,01	4,18	4,32	4,48	4,61	0,0001	100,00	0,73	2616,17	2,62	0,002616171	62788,11	62,79	0,06	188364,43	1883,64	1,88	
3	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,03	4,01	4,29	4,45	4,71	4,88	0,00015	150,00	1,09	3924,26	3,92	0,003924257	94182,17	94,18	0,09	282546,14	2825,47	2,83	
4	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,04	4,01	4,40	4,60	4,73	5,17	0,0002	200,00	1,46	5232,34	5,23	0,005232343	125762,28	125,76	0,13	3767936,86	37679,37	3,77	
5	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,05	4,01	4,52	4,82	5,08	5,41	0,00025	250,00	1,82	6042,61	6,04	0,006042615	146976,29	146,97	0,16	4709108,57	47091,11	4,71	
6	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,06	4,01	4,69	5,09	5,48	5,66	0,0003	300,00	2,18	7848,51	7,85	0,007848514	188364,34	188,36	0,19	5600930,29	56009,31	5,61	
7	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,07	4,01	4,89	5,33	5,67	5,86	0,00035	350,00	2,54	9156,60	9,16	0,0091566	219758,40	219,76	0,22	6592792,00	65927,92	6,59	
8	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,08	4,01	5,11	5,56	5,84	6,35	0,0004	400,00	2,91	10464,89	10,46	0,01104689	251152,46	251,15	0,25	7334873,71	73348,74	7,34	
9	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,09	4,01	5,42	5,79	6,47	7,34	0,00045	450,00	3,27	11772,77	11,77	0,011772771	282546,51	282,55	0,28	8476395,43	84763,95	8,48	
10	200	0,0073	26,16	627,88	18836,43	0,10	4,01	5,54	6,30	7,10	7,89	0,0005	500,00	3,63	13080,86	13,08	0,013080857	313940,57	313,94	0,31	9418213,14	94182,13	9,42	

Dari hasil percobaan pada 1 – 7 Juni 2023 diperoleh bahwa yang paling efektif dalam menetralkan AAT di SP *Crusher* I metode tanpa pengadukan adalah massa *fly ash* 0,08 gram dengan estimasi waktu 25 menit menaikkan pH=6,35 dari pH awal = 4,01. Berikut diagram hasil penetralkan AAT metode tanpa pengadukan.



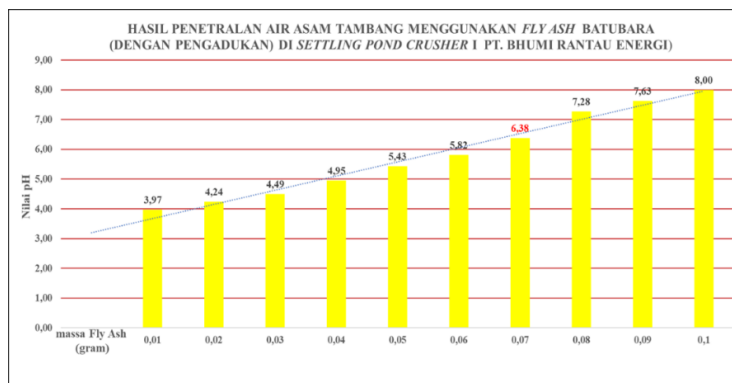
Gambar 13 Diagram Hasil Penetralan AAT Crusher I (Tanpa Pengadukan)

2) Penetralan AAT Menggunakan Fly Ash metode Dengan Pengadukan di SP Crusher I

Tabel 7 Hasil Penetralan AAT Crusher I (Dengan Pengadukan)

No	Volume Sampel AAT (ml)	Debit				massa Fly ash (gram)	pH Awal Fly Ash + H ₂ O (pH)	pH Awal AAT	pH Akhir Fly Ash + AAT (Pengadukan 2 menit)	gr/ml	gr/m ³	gr/det	Kebutuhan Fly Ash									
		m ³ /detik	m ³ /jam	m ³ /hari	m ³ /bulan								gr/jam	Kg/jam	Ton/jam	gr/hari	Kg/hari	Ton/hari	gr/bulan	Kg/bulan	Ton/bulan	
1	200	0,0075	26,85	644,30	19328,91	0,01	50,01	7,15	3,83	3,97	0,00005001	50,01	0,3729317	1342,5542	1,34	0,0013	32221,3	32,22	0,03	966639,00	966,64	0,97
2	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,02	50,02	7,31	3,88	4,24	0,00010004	100,04	0,7254329	2611,5585	2,61	0,0026	62677,404	62,68	0,06	1880322,11	1880,32	1,88
3	200	0,0075	26,85	644,30	19328,91	0,03	50,03	7,59	3,83	4,49	0,00015009	150,09	1,1192426	4029,2733	4,03	0,0040	95702,556	96,70	0,10	2910176,75	2910,18	2,90
4	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,04	50,04	7,87	3,88	4,95	0,00020016	200,16	1,4514459	5225,2054	5,23	0,0052	125404,93	125,40	0,13	3762147,88	3762,15	3,76
5	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,05	50,05	8,20	3,88	5,43	0,00025025	250,25	1,81467	6532,812	6,53	0,0065	158787,45	158,79	0,16	4793242,64	4793,24	4,79
6	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,06	50,06	8,52	3,88	5,82	0,00030036	300,36	2,1780391	7840,9407	7,84	0,0078	188182,58	188,18	0,19	5645477,31	5645,48	5,65
7	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,07	50,07	9,08	3,88	6,38	0,00035049	350,49	2,5415332	9149,5915	9,15	0,0091	219590,2	219,59	0,22	6587705,89	6587,71	6,59
8	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,08	50,08	9,49	3,88	7,28	0,00040064	400,64	2,9052123	10458,764	10,46	0,0105	251010,35	251,01	0,25	7530310,39	7530,31	7,53
9	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,09	50,09	9,94	3,88	7,63	0,00045081	450,81	3,2690165	11768,459	11,77	0,0118	282443,03	282,44	0,28	8473290,81	8473,29	8,47
10	200	0,0073	26,11	626,52	18795,70	0,1	50,1	10,50	3,88	8,00	0,000501	501	3,6329657	13078,677	13,08	0,0131	313888,24	313,89	0,31	9416647,13	9416,65	9,42

Pada metode dengan pengadukan, paling efektif adalah massa fly ash 0,07 dengan waktu 2 menit artinya lebih cepat menetralkan AAT di SP Crusher I dibandingkan tanpa pengadukan dengan massa 0,07 gram menaikkan AAT menjadi pH 6,38.



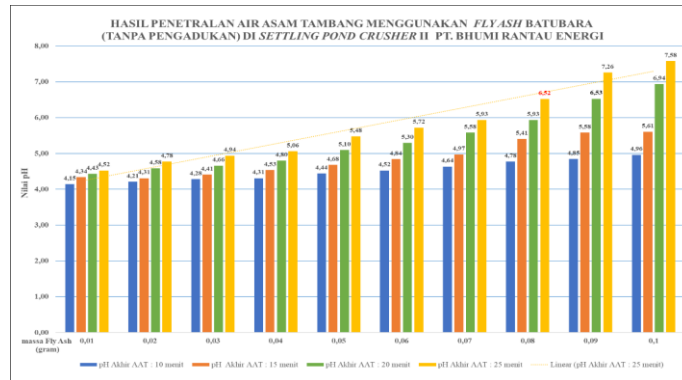
Gambar 14 Diagram Hasil Penetralan AAT Crusher I (Dengan Pengadukan)

3) Penetralan AAT Menggunakan Fly Ash metode Dengan Pengadukan di SP Crusher II

Tabel 8 Hasil Penetralan AAT Crusher II (Tanpa Pengadukan)

No	Volume Sampel AAT (ml)	Debit				massa Fly ash (gram)	pH Awal AAT	pH Fly Ash + AAT (Tanpa Pengadukan)				gr/ml	gr/m ³	gr/det	Kebutuhan Fly Ash									
		m ³ /detik	m ³ /jam	m ³ /hari	m ³ /bulan			10 menit	15 menit	20 menit	25 menit				gr/jam	Kg/jam	Ton/jam	gr/hari	Kg/hari	Ton/hari	gr/bulan	Kg/bulan	Ton/bulan	
1	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,01	4,07	4,15	4,34	4,43	4,52	0,00005	50	0,034	48,91	0,05	0,0005	1173,787	1,174	0,001	35213,616	35,214	0,035	
2	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,02	4,07	4,21	4,31	4,58	4,78	0,0001	100	0,027	97,82	0,10	0,0010	2347,574	2,348	0,002	70427,232	70,427	0,070	
3	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,03	4,07	4,28	4,41	4,66	4,94	0,00015	150	0,041	146,72	0,15	0,0015	3521,362	3,521	0,004	105640,848	105,641	0,106	
4	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,04	4,07	4,31	4,53	4,80	5,06	0,0002	200	0,054	195,63	0,20	0,0020	4695,149	4,695	0,005	140854,464	140,854	0,141	
5	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,05	4,07	4,44	4,68	5,10	5,48	0,00025	250	0,068	244,54	0,24	0,0024	5868,936	5,869	0,006	176068,080	176,068	0,176	
6	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,06	4,07	4,52	4,84	5,30	5,72	0,0003	300	0,082	293,45	0,29	0,0029	7042,723	7,043	0,007	211281,696	211,282	0,211	
7	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,07	4,07	4,64	4,97	5,58	5,93	0,00035	350	0,095	342,35	0,34	0,0034	8216,510	8,217	0,008	246495,312	246,495	0,246	
8	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,08	4,07	4,78	5,41	5,99	6,32	0,0004	400	0,109	391,26	0,39	0,0039	9302,298	9,303	0,009	281706,928	281,707	0,282	
9	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,09	4,07	4,85	5,58	6,53	7,26	0,00045	450	0,122	440,17	0,44	0,0044	10564,085	10,564	0,011	316922,544	316,923	0,317	
10	200	0,00027	0,98	23,48	704,27	0,1	4,07	4,94	5,84	6,94	7,65	0,0005	500	0,135	489,08	0,49	0,0049	12116,160	12,116	0,012	363216,160	363,216	0,363	

Dari hasil percobaan pada 1–7 Juni 2023 diperoleh bahwa yang paling efektif dalam menetralkan AAT di SP *Crusher* II dengan metode tanpa pengadukan menggunakan *fly ash* adalah massa *fly ash* 0,08 gram dengan estimasi waktu 25 menit menaikkan pH dari pH=4.07 menjadi pH=6,52.



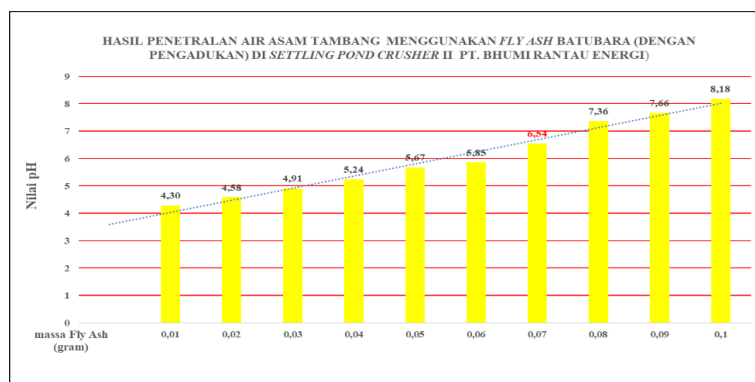
Gambar 15 Diagram Hasil Penetralan AAT *Crusher* II (Tanpa Pengadukan)

4) Penetralan AAT Menggunakan *Fly Ash* metode Dengan Pengadukan di SP *Crusher* I

Tabel 9 Hasil Penetralan AAT *Crusher* II (Dengan Pengadukan)

Percobaan	Volume Sampel AAT (ml)	Debit				massa Fly ash (50 ml H ₂ O (ml)	pH Awal Fly Ash	pH Awal AAT	pH Akhir Fly Ash + AAT (Pengadukan 2 menit)	gr/ml	gr/m ³	gr/det	Kebutuhan Fly Ash									
		m ³ /detik	m ³ /jam	m ³ /hari	m ³ /bulan								gr/jam	Kg/jam	Ton/jam	gr/hari	Kg/hari	Ton/hari	gr/bulan	kg/bulan	Ton/bulan	
1	200	0,000272	0,98	23,52	705,55	0,01	50,01	7,31	4,07	4,30	0,00005	50,01	0,0136	49,0066	0,0490	0,00005	1176,16	1,18	0,00	35284,73	35,28	0,04
2	200	0,000272	0,98	23,52	705,55	0,02	50,02	7,59	4,07	4,58	0,00010	100,04	0,0272	98,0327	0,0980	0,00010	2352,79	2,35	0,00	70583,57	70,58	0,07
3	200	0,000272	0,98	23,52	705,55	0,03	50,03	7,77	4,07	4,91	0,00015	150,09	0,0409	147,0785	0,1471	0,00015	3529,88	3,53	0,00	105896,53	105,90	0,11
4	200	0,000271	0,97	23,38	701,40	0,04	50,04	8,14	4,17	5,24	0,00020	200,16	0,0542	194,9881	0,1950	0,00019	4679,71	4,68	0,00	140391,41	140,39	0,14
5	200	0,000271	0,97	23,38	701,40	0,05	50,05	8,75	4,07	5,67	0,00025	250,25	0,0677	243,7838	0,2438	0,00024	5850,81	5,85	0,01	175524,33	175,52	0,18
6	200	0,000271	0,97	23,38	701,40	0,06	50,06	9,21	4,07	5,85	0,00030	300,36	0,0813	292,5990	0,2926	0,00029	7022,38	7,02	0,01	210671,28	210,67	0,21
7	200	0,000272	0,98	23,52	705,55	0,07	50,07	10,02	4,07	6,54	0,00035	350,49	0,0954	343,4576	0,3435	0,00034	8242,98	8,24	0,01	247289,45	247,29	0,25
8	200	0,000272	0,98	23,52	705,55	0,08	50,08	10,39	4,07	7,36	0,00040	400,64	0,1091	392,6013	0,3926	0,00039	9422,43	9,42	0,01	282672,96	282,67	0,28
9	200	0,000271	0,97	23,38	701,40	0,09	50,09	10,84	4,00	7,66	0,00045	450,81	0,1220	439,1615	0,4392	0,00044	10539,88	10,54	0,01	316196,30	316,20	0,32
10	200	0,000271	0,97	23,38	701,40	0,1	50,1	11,08	4,07	8,18	0,00050	501	0,1356	488,0547	0,4881	0,00049	11713,31	11,71	0,01	351399,37	351,40	0,35

Pada metode dengan pengadukan, paling efektif adalah massa *fly ash* 0,07 dengan waktu 2 menit artinya lebih cepat menetralkan AAT dibandingkan tanpa pengadukan dengan menaikkan pH dari pH=4.07 menjadi pH=6,54.



Gambar 16 Diagram Hasil Penetralan AAT Crusher II (Dengan Pengadukan)

E. Analisis Efektifitas dan Efisiensi Pemanfaatan Fly Ash

Biaya atau *cost* adalah hal penting bagi perusahaan. Berbagai cara akan dilakukan perusahaan untuk menekan *cost* dan mendapatkan hasil yang maksimal. PT. Bhumi Rantau Energi juga terus berupaya untuk hal ini, maka dari itu penggunaan *fly ash* bisa menjadi alternatif untuk menekan *cost* pada penetralan air asam tambang. Berikut estimasi biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk menggunakan *fly ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau.

Tabel 10 Estimasi Biaya Fly Ash ke PT. Bhumi Rantau Energi

Anggaran Biaya untuk Kebutuhan Fly Ash Batubara Per Bulan untuk Penetralan Settling Pond Crusher I dan Settling Pond Crusher II dari PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau ke PT. Bhumi Rantau Energi					
No	Item	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
1	Sewa Dump Truck Hino 500 FM 260 JD dan Bensin	1		Rp. 2.000.000,00	Rp. 2.000.000,00
2	Fly Ash Batubara	8	Ton	Rp. 30.000,00	Rp. 240.000,00
3	Plastik sampah	160	pcs	Rp. 5.000,00	Rp. 800.000,00
4	Karung isi 50 Kg	160	pcs	Rp. 2.000,00	Rp. 320.000,00
5	Terpal	3	Buah	Rp. 120.000,00	Rp. 360.000,00
6	Helper	2	Orang	Rp. 200.000,00	Rp. 400.000,00
Biaya Total 8 Ton					Rp. 4.120.000,00
Biaya Total 1 Kilogram					Rp. 515,00

x

Dari hasil anggaran biaya diatas diperoleh hasil yang dibutuhkan untuk menyuplai *fly ash* dari PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau ke PT. Bhumi Rantau Energi didapatkan biaya sebesar Rp. 515,00/kilogram. Sehingga diperoleh anggaran biaya untuk menetralkan AAT pada SP Crusher I dan SP Crusher II menggunakan metode tanpa pengadukan dan dengan pengadukan

Tabel 11 Estimasi Biaya Penetralan AAT di SP Crusher

Kebutuhan <i>Fly Ash</i> untuk Menetralkan AAT di <i>Settling Pond Crusher I</i>						
No	Penetral dan Metode	Debit Air (m ³ /detik)	massa <i>Fly Ash</i> /Bulan (Kg)	Harga/Kg	Biaya/Bulan	Biaya/Tahun
1	<i>Fly Ash</i> Tanpa Pengadukan	0,0072	7.534,57	Rp. 515,00	Rp 3.880.303,55	Rp.46.563.642,60
2	<i>Fly Ash</i> Dengan Pengadukan	0,0072	6.587,71	Rp.515,00	Rp 3.392.670,65	Rp.40.712.047,80

Tabel 12 Estimasi Biaya Penetralan AAT di SP Crusher II

Kebutuhan <i>Fly Ash</i> untuk Menetralkan AAT di <i>Settling Pond Crusher II</i>						
No	Penetral dan Metode	Debit Air (m ³ /detik)	massa <i>Fly Ash</i> /Bulan (Kg)	Harga/Kg	Biaya/Bulan	Biaya/Tahun
1	<i>Fly Ash</i> Tanpa Pengadukan	0,00027	281,71	Rp 515,00	Rp 145.080,65	Rp 1.740.967,80
2	<i>Fly Ash</i> Dengan Pengadukan	0,00027	247,29	Rp 515,00	Rp 127.354,35	Rp 1.528.252,20

Dari tabel diatas maka biaya total yang harus dikeluarkan PT. Bhumi Rantau Energi untuk menetralkan AAT adalah sebagai berikut.

Tabel 13 Total Biaya Penetralan AAT di SP Crusher I dan SP Crusher II

Biaya Total Penggunaan <i>Fly Ash</i> dan Kapur Tohor untuk Menetralkan Air Asam Tambang SP Crusher I dan SP Crusher II di PT. Bhumi Rantau Energi					
No	Penetral dan Metode	Harga/Kg	Kebutuhan (Kilogram)	Estimasi Biaya/Bulan	Estimasi Biaya/Tahun
1	<i>Fly Ash</i> Tanpa Pengadukan	Rp 515,00	7816,28	Rp 4.025.384,20	Rp 48.304.610,40
2	<i>Fly Ash</i> Dengan Pengadukan	Rp 515,00	6835	Rp 3.520.025,00	Rp 42.240.300,00

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan limbah *fly ash* PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau dapat digunakan untuk menaikkan pH air asam tambang PT. Bhumi Rantau Energi. Penggunaan *fly ash* dengan pengadukan lebih efektif dan efisien dari penggunaan massa dan biaya yang dikeluarkan daripada penggunaan *fly ash* dengan metode tanpa pengadukan untuk menetralkan air asam tambang.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka terdapat kesimpulannya yaitu, 1) Debit asam tambang tambang yang masuk ke SP Crusher I relatif kecil, yaitu 0,0073 m³/s. Debit AAT yang masuk ke SP Crusher II lebih kecil dari SP Crusher I, yaitu 0,00027 m³/s. 2) PT. Bhumi Rantau Energi memiliki 13 settling pond. Pada penelitian ini hanya membahas 1 (satu) parameter baku mutu air yaitu nilai pH, maka peneliti hanya membahas 2 settling pond yaitu SP Crusher I dan SP Crusher II yang hanya memiliki pH yang rendah. Hal ini disebabkan karena SP Crusher I dan SP Crusher II adalah AAT yang terbentuk karena penimbunan batubara di stock ROM. Pada SP Crusher I dan SP Crusher II masing-masing memiliki 6 (enam) kompartemen. 3) Kandungan Fly ash batubara PT. PLN Nusantara Power Pulang Pisau memiliki kandungan silika oksida, Aluminium Oksida, Besi (II) Oksida, Kalsium Oksida, Magnesium Oksida, Natrium Oksida dan Kalium Oksida yang bersifat alkalin. 4) penelitian ini menggunakan 2 (dua) metode pada uji jar test yaitu metode tanpa pengadukan fly ash dan metode dengan pengadukan fly ash. Perbandingan massa dari hasil percobaan pada SP Crusher I dengan metode tanpa pengadukan dan dengan pengadukan adalah 0,08:0,07 gram, begitu juga dengan SP Crusher II juga memiliki massa dari hasil perbandingan dari metode tersebut adalah 0,08:0,07 gram. Artinya metode dengan pengadukan lebih efektif dari perbandingan massa. 5) Harga dengan fly ash Rp. 4.025.384,20/bulan dan Rp. 48.304.610,40/tahun untuk fly ash tanpa pengadukan. Dengan pengadukan adalah sebesar Rp. 3.520.025/bulan dan Rp. 42.240.300,00/Tahun. Penggunaan fly ash dengan pengadukan lebih efektif dan efisien daripada tanpa pengadukan dikarenakan massa yang digunakan lebih sedikit dan harga lebih terjangkau serta penggunaannya dapat mengurangi limbah fly ash dengan mengolahnya pada AAT yang bertujuan menaikkan pH air dapat menjadi produk bermanfaat bagi perusahaan maupun masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, M., Yusuf, F. N., Harwan, H., Chalik, C. A., Nurhawaisyah, S. R., Jafar, N., Asmiani, N., Heriansyah, A. F., Ansariah, A., & Budiman, A. A. (2022). Analisis Karakteristik Penetrasi Fly Ash Batubara Terhadap Air Asam Dengan Metode Acid Buffer Characteristic Curve. *Jurnal Geomine*, 9(3), 218–228.
- Fahrudin, M. S. (2018). *Pengelolaan Limbah Pertambangan Secara Biologis: Biological Management Of Mining Waste (Ind Sub)* (Vol. 1). Celebes Media Perkasa.
- Fauzi, D. A. (2022). *Analisa Efisiensi Generator Pltu Pulang Pisau Pada Saat Pembebanan*. Universitas Islam Kalimantan Mab.
- Herlina, A., Handayani, H. E., & 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 Sriwijaya*, 2(2), 102629.
- Jiyah, J., Sudarsono, B., & Sukmono, A. (2017). Studi Distribusi Total Suspended Solid (Tss) Di Perairan Pantai Kabupaten Demak Menggunakan Citra Landsat. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(1), 41–47.
- Klarens, K., Indranata, M., Antoni, A., & Hardjito, D. (2016). Pemanfaatan Bottom Ash Dan Fly Ash Tipe C Sebagai Bahan Pengganti Dalam Pembuatan Paving Block. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 5(2).
- Nisfi Sya'bani, K. (2023). *Pengaruh Penambahan Air Belerang Alami, Kapur Dan Semen Pada Air Asam Tambang Area Pertambangan Batu Hijau Sumbawa Barat*. Universitas Mataram.
- Prasetya, I., Syauqi, M., & Aini, A. S. (2021). Application Of Central Kalimantan Coal Ash As A Sustainable Construction Material. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 758(1), 12011.
- Putra, A. E. (2017). *Pemanfaatan Serat Aluminium Dari Usaha Mikro Menengah Di Kec. Tampan Sebagai Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Beton*. Universitas Islam Riau.
- Said, M. S., Nurhawaisyah, S. R., Juradi, M. I., Asmiani, N., & Kusuma, G. J. (2020). Analisis Kandungan Fly Ash Sebagai Alternatif Bahan Penetrasi Dalam Penanggulangan Air Asam Tambang. *Jurnal Geomine*, 7(3), 170.
- Samosir, G. B. G., & Rusli, H. A. R. (2021). Pemanfaatan Fly Ash Bottom Ash Dan Tawas Untuk Menetralkan Air Asam Tambang. *Bina Tambang*, 6(4), 102–111.
- Syaefudin, M. A., Triantoro, A., & Riswan, R. (2020). Analisis Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Alternatif Naf Yang Digunakan Dalam Upaya Pencegahan Pembentukan Air Asam Tambang Pada Pt Jorong Barutama Greston. *Jurnal Geosapta*, 6(1), 39–42.
- Utami, S. W. (2018). Karakteristik Kimiawi Fly Ash Batu Bara Dan Potensi Pemanfaatannya Sebagai Bahan Pupuk Organik. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 12(2), 108–112.
-

Yulinda Br Surbakti¹, Fahrul Indrajaya², Saptawartono³

Analysis Of Coal Fly Ash Waste Utilization Pt. Pln Nusantara Power Home Knife For Acid Mine Water Neutralization

Yuniar, F. (2020). *Karakterisasi Dan Uji Toleransi Kadmium Pada Isolat Bakteri Pereduksi Sulfat Dari Air Asam Tambang*. Universitas Hasanuddin.

Yusmur, A., Ardiansyah, M., & Mansur, I. (2019). Mitigasi Dan Arahana Pengelolaan Air Asam Tambang Melalui Hutan Rawa Buatan Di Lahan Pasca Tambang. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal Of Natural Resources And Environmental Management)*, 9(3), 566–576.



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).