



Analisis Pengaruh Pencampuran *Fly Ash* Terhadap Sifat Fisik Dan Geokimia Potensi Pembentukan Asam Pada Batuan *Potential Acid Forming* Menggunakan Uji Kinetik *Free Draining Column Leach Test*

Muhammad Ilham Kadar¹, Laode Jonas Tugo², Tri Utomo Taliding³, La Ode Miqdad Husein⁴

*Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Halu Oleo Kendari*

**E-mail: kadarmuhammadilham@gmail.com*

SARI

Air Asam Tambang (AAT) adalah permasalahan lingkungan utama yang timbul karena aktivitas penambangan, terutama pada batuan yang mengandung mineral sulfida. Upaya pencegahan AAT umumnya dilakukan melalui pencampuran material *Potential Acid Forming* (PAF) dengan material *Non Acid Forming* (NAF) yang berfungsi sebagai penetral. Namun, keterbatasan ketersediaan batuan NAF di lapangan mendorong perlunya pemanfaatan material alternatif yang tersedia di sekitar lokasi tambang. Salah satu material yang berpotensi digunakan adalah *fly ash*, limbah padat dari PLTU mulut tambang yang memiliki kemampuan menambah alkalinitas pada material campuran. Hasil penelitian laboratorium sebelumnya menunjukkan bahwa pencampuran PAF dengan *fly ash* mampu mengurangi potensi terbentuknya AAT melalui mekanisme netralisasi. Uji geokimia dilakukan untuk menilai potensi batuan dalam menghasilkan air asam tambang melalui identifikasi kandungan sulfida dan kapasitas penyangga mineralnya. Selain itu, pengujian juga bertujuan mengevaluasi kemampuan *fly ash* sebagai material penetral, khususnya dalam menyediakan alkalinitas yang mampu menekan pembentukan asam. Tahapan penelitian meliputi pengujian distribusi ukuran butir, uji statik, analisis mineralogi (XRD), analisis kimia (XRF), serta uji kinetik. Simulasi pembentukan air lindian dilakukan menggunakan metode *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) dengan variasi ukuran butir PAF (halus dan kasar) dan proporsi *fly ash* (5%, 10%, dan 20%). Hasil penelitian pengaruh ukuran butir PAF tidak memberikan pengaruh terhadap kualitas air lindian yang dihasilkan. Sebaliknya, peningkatan persentase *fly ash* secara langsung meningkatkan kapasitas alkalinitas campuran sehingga lebih efektif dalam mencegah pembentukan AAT dan menurunkan potensi oksidasi pirit. Campuran PAF–*fly ash* sebesar 20% terbukti memberikan kinerja terbaik dalam periode pengujian 10 minggu, ditunjukkan oleh air lindian yang tetap berada pada kondisi netral dan stabil.

Kata kunci: Air Asam Tambang, Potensial Acid Forming, Non Acid Forming, *Fly Ash*, Free Draining Column Leach Test

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Phone:

+6285299961257

+6281241908133

Article History:

Submite

Received in from

Accepted

Available online

Lisensec By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)





ABSTRACT

Acid Mine Drainage (AMD) is a major environmental problem arising from mining activities, particularly in rocks containing sulfide minerals. Amd prevention efforts are generally implemented by mixing Potential Acid-Forming (PAF) materials with Non-Acid-Forming (NAF) materials, which function as neutralizers. However, the limited availability of NAF rocks in the field has prompted the use of alternative materials available near mine sites. One potential material is fly ash, a solid waste from mine-mouth power plants (PLTUs), which has the ability to increase alkalinity in the mixed material. Previous laboratory studies have shown that mixing PAF with fly ash can reduce the potential for AMD formation through neutralization mechanisms. Geochemical tests were conducted to assess the potential of rocks to produce acid mine drainage by identifying their sulfide content and mineral buffering capacity. Furthermore, the tests also aimed to evaluate the ability of fly ash as a neutralizing material, particularly in providing alkalinity that can suppress acid formation. The research stages included grain size distribution testing, static testing, mineralogical analysis (XRD), chemical analysis (XRF), and kinetic testing. Leachate formation simulations were conducted using the Free Draining Column Leach Test (FDCLT) method, varying PAF grain sizes (fine and coarse) and fly ash proportions (5%, 10%, and 20%). The results showed that the influence of PAF grain size did not affect the quality of the resulting leachate. Conversely, increasing the percentage of fly ash directly increased the alkalinity capacity of the mixture, making it more effective in preventing AAT formation and reducing the potential for pyrite oxidation. The 20% PAF–fly ash mixture proved to provide the best performance over the 10-week test period, as evidenced by the leachate remaining neutral and stable.

Keyword: *Mine Acid Water, Acid-Forming Potential, Non-Acid-Forming Potential, Fly Ash, Column Leaching Test with Free Drainage*

PENDAHULUAN

Air asam tambang (AAT) merupakan air yang terbentuk akibat oksidasi mineral sulfida ketika bereaksi dengan oksigen dan air, sehingga menghasilkan air dengan pH rendah serta berpotensi melarutkan berbagai logam ke lingkungan (Nordstrom, 2019; Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2018). Upaya pencegahan pembentukan AAT dapat dilakukan melalui pendekatan fisik maupun kimiawi. Secara fisik, pengendalian dilakukan dengan membatasi kontak antara mineral sulfida, air, dan oksigen melalui pengelolaan material timbunan, seperti pemisahan batuan *Potential Acid Forming* (PAF) dan *Non Acid Forming* (NAF), penerapan metode enkapsulasi, pelapisan (*cover system*), maupun pencampuran (*blending*). Pada metode pencampuran, material PAF dikombinasikan dengan material yang memiliki kapasitas penetralan sehingga mampu mengurangi potensi pembentukan asam (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2018; Kefeni et al., 2017).

Dalam penerapan metode pencampuran, salah satu kendala utama di lapangan adalah terbatasnya ketersediaan material NAF sebagai bahan penetral. Oleh karena itu, diperlukan material alternatif yang mudah diperoleh serta memiliki kapasitas netralisasi yang tinggi. *Fly ash*, sebagai limbah hasil pembakaran batubara pada PLTU mulut tambang PT. Tanjung Power Indonesia, merupakan salah satu material yang berpotensi dimanfaatkan karena



mengandung senyawa alkali, terutama CaO, serta memiliki sifat pozzolan yang mampu meningkatkan kapasitas penetralan terhadap air asam tambang (Qureshi et al., 2016; Shirin et al., 2021).

Selain memiliki kandungan CaO yang tinggi, *fly ash* juga memiliki ukuran partikel halus, konduktivitas hidraulik yang rendah, serta mampu mengalami proses sementasi pada kondisi basah. Karakteristik tersebut tidak hanya meningkatkan kapasitas netralisasi, tetapi juga mengurangi infiltrasi air ke dalam timbunan batuan sehingga dapat memperlambat proses oksidasi mineral sulfida (Qureshi et al., 2016; Moersidik et al., 2022). Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash* efektif dalam meningkatkan pH, menurunkan konsentrasi logam terlarut, serta memperbaiki kualitas air asam tambang (Nurlela et al., 2025; Deng et al., 2026).

Pada penelitian ini dilakukan simulasi beberapa komposisi pencampuran *fly ash* pada batuan *Potential Acid Forming* (PAF) menggunakan metode *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) untuk mengevaluasi pengaruh variasi nilai *Net Acid Producing Potential* (NAPP), ukuran butir (kasar dan halus), serta rasio penambahan *fly ash* yang direpresentasikan oleh perubahan nilai *Neutralization Potential Ratio* (NPR) terhadap kualitas air lindian. Karakteristik fisik dianalisis melalui uji ayak, uji hidrometer, *index properties*, dan *Atterberg limit*, sedangkan karakteristik geokimia dievaluasi melalui uji statik, uji kinetik, serta analisis mineralogi dan unsur. Penggunaan uji kinetik FDCLT dipilih karena mampu mensimulasikan kondisi pelindian yang mendekati kondisi lapangan sehingga memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap dinamika pembentukan air asam dibandingkan uji statik (Abfertiawan et al., 2024).

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pendekatan yang mengintegrasikan karakterisasi sifat fisik dan geokimia batuan PAF dalam mengevaluasi efektivitas *fly ash* sebagai material penetral melalui uji kinetik FDCLT. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya berfokus pada efektivitas *fly ash* dalam meningkatkan pH atau menurunkan konsentrasi logam terlarut (Shirin et al., 2021; Moersidik et al., 2022; Nurlela et al., 2025), penelitian ini mengombinasikan variasi ukuran butir, nilai NAPP, dan rasio *fly ash* (NPR) untuk mengkaji pengaruhnya terhadap kualitas air lindian selama proses pelindian yang mensimulasikan kondisi lapangan. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik fisik, kapasitas penetralan, dan dinamika pembentukan air asam tambang, sekaligus menjadi dasar dalam menentukan komposisi *fly ash* yang paling efektif sebagai strategi pengelolaan batuan PAF.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik air lindian yang terbentuk dari proses pembentukan Air Asam Tambang (AAT) melalui uji kinetik skala laboratorium menggunakan metode *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT). Selain itu, penelitian



difokuskan pada bagaimana sifat fisik serta karakteristik geokimia campuran material Potential Acid Forming (PAF) dan fly ash mempengaruhi mekanisme pembentukan maupun upaya pencegahan AAT. Sampel yang digunakan merupakan batuan penutup (*overburden*) dari PT Adaro Indonesia dan *fly ash* yang berasal dari PLTU mulut tambang PT Tanjung Power Indonesia.

Tahap awal penelitian dilakukan melalui uji statik yang berfungsi mengidentifikasi potensi pembentukan asam dari batuan tanpa mempertimbangkan laju reaksi yang sebenarnya. Uji statik yang dilakukan meliputi pengukuran pH *pasta*, *Acid Neutralizing Capacity* (ANC), *Net Acid Generation* (NAG), serta total sulfur (S-total). Hasil uji ini memberikan gambaran awal mengenai kecenderungan batuan untuk menghasilkan asam sesuai pedoman yang umum digunakan dalam penilaian potensi AAT.

Selanjutnya, uji kinetik digunakan untuk mensimulasikan proses pelapukan jangka panjang dan reaksi pembentukan asam di lapangan melalui eksperimen laboratorium. Pada metode FDCLT, sampel mengalami dua kondisi berulang, yakni siklus basah dan siklus kering. Pengujian kinetik tersebut memungkinkan pengamatan lebih rinci terhadap perubahan kondisi sampel serta dinamika pelepasan ion dan unsur selama proses pelindian.

Karakterisasi fisik material dilakukan melalui analisis distribusi ukuran butir, menggunakan metode ayakan untuk fraksi yang lebih kasar dari 0,075 mm dan metode hidrometer untuk fraksi yang lebih halus. Pendekatan ini memberikan gambaran lengkap mengenai tekstur dan komposisi butiran material. Selain itu, analisis mineralogi juga dilakukan untuk mengetahui komposisi mineral penyusun batuan dan *fly ash* menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dengan perangkat *Rigaku Smartlab* dan *Rigaku Supermini 200*. Analisis mineralogi sangat penting karena komposisi mineral menentukan perilaku geokimia material, termasuk potensi oksidasi sulfida dan kapasitas netralisasi.

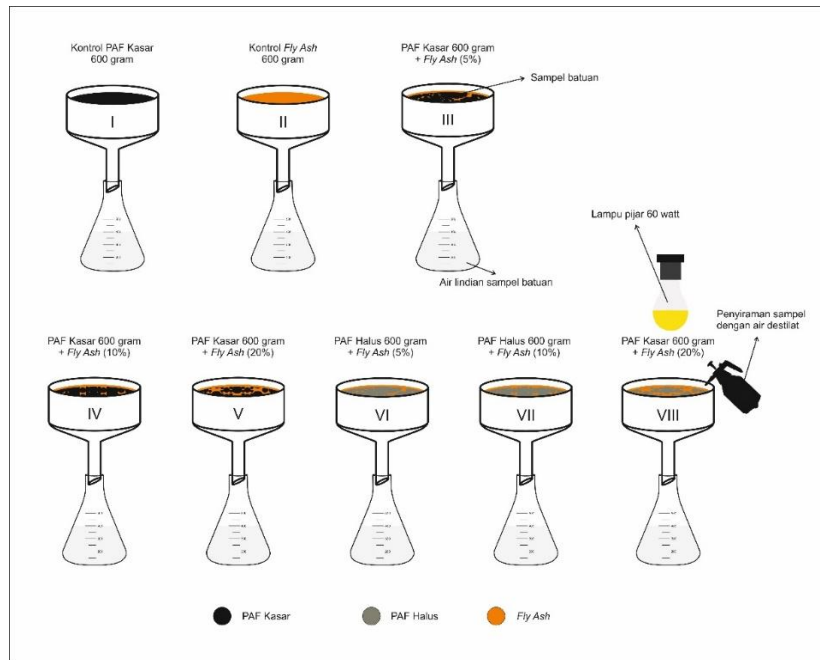
Fly ash berperan signifikan sebagai agen penetral AAT. Kandungan CaO dalam *fly ash* berkisar 10–20% sehingga mampu meningkatkan alkalinitas campuran dan menetralkan AAT secara cepat. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *fly ash* dapat menaikkan pH larutan asam dari 2,5 menjadi sekitar 6,5 hanya dalam waktu 30 menit (Pradhan & Desmukh, 2008), sehingga material ini berpotensi diaplikasikan sebagai material campuran maupun *capping* dalam upaya mitigasi AAT.

Analisis kualitas air lindian dari uji kinetik serta air *eksisting* mencakup dua kelompok pengujian, yaitu uji fisik dan uji kimia. Uji fisik terdiri atas pengukuran pH, ORP, TDS, EC, suhu, dan volume air lindian. Hasil keseluruhan analisis ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai respon geokimia material campuran PAF–*fly ash* terhadap proses pelindian yang berlangsung pada Uji Kinetik *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT).

Uji kinetik *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) dirancang untuk mensimulasikan proses pelindian yang terjadi pada kondisi lapangan melalui pengulangan dua



kondisi utama, yaitu siklus basah dan siklus kering. Pada siklus kering, sampel dikondisikan dalam keadaan terpapar panas dengan penyinaran menggunakan lampu 60 *watt* selama 12 jam per hari untuk mempercepat proses evaporasi dan oksidasi. Sementara itu, siklus basah dilakukan dengan melakukan penyiraman sampel menggunakan air destilat dengan rasio air terhadap padatan (*water to solid ratio*) sebesar 1:2. Seluruh sampel ditempatkan dalam *Buchner funnel* berdiameter luar 150 mm dan tinggi 60 mm sehingga memungkinkan aliran air lindian mengalir bebas melewati material uji.



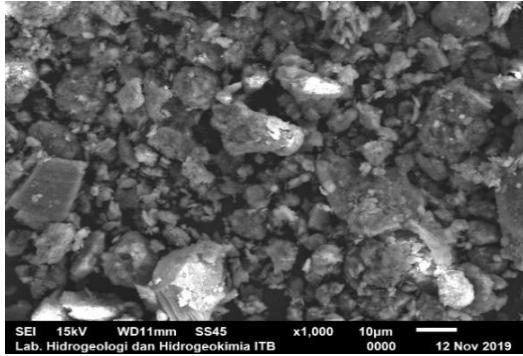
Gambar 1. Komposisi pencampuran material PAF dan *fly ash*

HASIL PENELITIAN

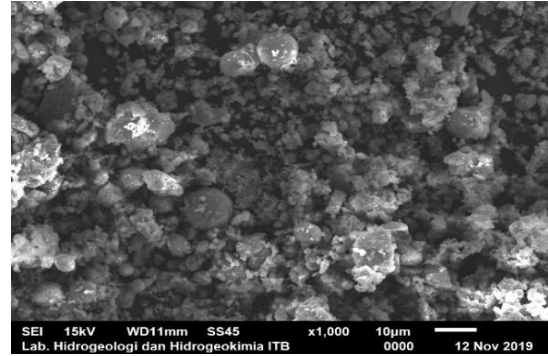
Hasil Uji Sifat Fisik Material

1. Morfologi butir

Karakteristik morfologi butir pada sampel PAF dan fly ash dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) dengan tingkat pembesaran 1.000× pada skala 10 μm .



Gambar 2. Bentuk butir PAF



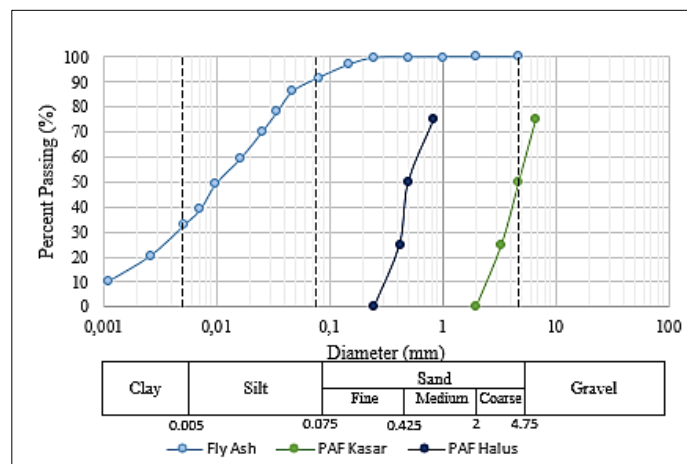
Gambar 3. Bentuk Butir *Fly Ash*

2. Sifat Fisik Sampel

Uji sifat fisik material batuan penutup berpotensi pembentuk asam (PAF) dan *fly ash* (FA) dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Institut Teknologi Bandung untuk menentukan distribusi ukuran butir secara menyeluruh.

Tabel 1. Hasil analisis distribusi ukuran

Sampel	Distribusi Ukuran Partikel (%)			
	<i>Gravel</i>	<i>Sand</i>	<i>Silt</i>	<i>Clay</i>
<i>Fly Ash</i>	0.00	8.35	59.49	32.16



Gambar 4. Distribusi ukuran butir PAF kasar, PAF halus dan *Fly Ash*

Hasil pengujian *Atterberg Limit* dan *Shrinkage limit* pada sampel batuan penutup (PAF) dapat dilihat di Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian *atterberg limit* dan *shrinkage limit* sampel batuan penutup (PAF)

Parameter <i>atterberg limit</i>	Nilai (%)
<i>Liquid Limit</i> (batas cair) = W_L	46.45
<i>Plastis Limit</i> (batas plastis) = W_P	26.09
<i>Plastisity Index</i> (indeks plastis) $I_P = W_L - W_P$	20.37
<i>Shrinkage limit</i>	21.96



Nilai *Index properties* dari sampel batuan dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah. Hasil pengujian *specific gravity* dan porositas pada sampel batuan penutup (PAF).

Tabel 3. *Index properties* sampel batuan

<i>Index properties</i>	PAF (%)	<i>Fly Ash</i> (%)
<i>Specific gravity (SG)</i>	2.60	3.13
<i>Porositas (n)</i> PAF kasar	19.1	-
<i>Porositas (n)</i> PAF halus	24	-

Hasil Uji Mineralogi dan Unsur Sampel

Uji XRD

Uji X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis mineralogi yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis-jenis mineral dalam suatu sampel dengan memanfaatkan pancaran dan difraksi sinar-X.

Tabel 4. Hasil Uji XRD sampel PAF dan *Fly Ash*

Kode Sampel	Kandungan Mineral
Batuan Penutup (PAF)	<i>Quartz</i> (SiO_2), <i>Jarosite</i> ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$), <i>kaolinite group mineral</i> (<i>Halloysite</i> ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), <i>Dickite</i> ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)), dan pirit (FeS_2)
<i>Fly Ash</i> (FA)	<i>Quartz</i> (SiO_2), <i>Periclase</i> (MgO), <i>Monticellite</i> (CaMgSiO_4), <i>Anhydrite</i> (CaSO_4), <i>Pyroxene</i> ($\text{XY}(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}$), dan <i>Sodalite</i> ($\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2$)

Uji XRF

Uji X-Ray Fluorescence (XRF) adalah metode analisis kimia yang digunakan untuk menentukan kandungan unsur (*elemental composition*) dalam suatu sampel secara cepat dan akurat.

Tabel 5. Hasil Uji XRF sampel PAF dan *Fly Ash*

Komponen Satuan	<i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	
	Nilai	
	PAF (%)	<i>Fly Ash</i> (%)
Al_2O_3	24.0	10.80
SiO_2	56.0	32.9
Fe_2O_3	8.23	17.9
SO_3	6.51	5.01
K_2O	2.88	1.11
CaO	0.427	24.0
TiO_2	1.48	0.825
MnO	0.0474	0.246
MgO	0.330	6.24
SrO	0.0212	0.258
Rb_2O_3	0.0250	-
ZrO_2	0.0443	-
Na_2O	-	0.0771
P_2O_5	-	0.205
CuO	-	0.0304
ZnO	-	0.0542
BaO	-	0.418



Hasil Uji Statik

Uji statik adalah rangkaian pengujian geokimia awal yang digunakan untuk menentukan potensi pembentukan air asam tambang (AAT) dari suatu material batuan atau tanah.

Tabel 6. Hasil uji statik PAF dan *fly ash*

Kode	pH Pasta	Net Acid Generation			Acid Base Accounting (ABA)				Klasifikasi Sampel
		NAG pH	NAG		Total Sulfur (%)	MPA (*)	ANC (*)	NAPP (*)	
			pH 4.50*)	pH 7.00*)					
PAF	2.54	2.26	86.24	128.28	1.35	41.34	0.00	41.34	PAF
<i>Fly Ash</i>	11.68	11.50	0.00	0.00	1.45	44.41	580.04	-535.63	NAF

Tabel 7. Hasil uji statik PAF dan *fly ash*

Kode	Net Acid Generation			NAPP	Klasifikasi Sampel
	NAG	NAG			
	pH	pH 4.50*)	pH 7.00*)		
PAF + FA (5%)	2.58	2.24	4.54	5%	PAF
PAF + FA (10%)	3.90	0.86	3.71	10%	UC
PAF + FA (20%)	6.73	-	0.12	20 %	NAF

Keterangan: *) = dalam kg H₂SO₄/ton

NAG = *Net Acid Generating*

MPA = *Maximum Potential Acidity*

ANC = *Acid Neutralizing Capacity*

NAPP = *Net Acid Producing Potential*

Hasil Uji Kinetik

Uji kinetik adalah metode pengujian geokimia yang digunakan untuk mensimulasikan proses pelapukan, oksidasi mineral sulfida, dan pembentukan air asam tambang (AAT) dalam kondisi mendekati keadaan lapangan.

Free Draining Column Leach Test (FDCLT)

Berdasarkan Tabel 8, hasil pengukuran pH selama uji kinetik *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) menunjukkan bahwa sampel kontrol tanpa penambahan *fly ash* memiliki pH sangat rendah (1,69–2,23), yang mengindikasikan potensi pembentukan air asam tambang. Penambahan *fly ash* secara bertahap meningkatkan pH air lindi, dengan kisaran 2,52–3,68 pada komposisi 5%, 3,22–6,09 pada 10%, dan mencapai 6,46–7,51 pada 20%. Tren yang sama juga terjadi pada sampel berukuran butir halus, di mana penambahan *fly ash* 20% mampu mempertahankan pH pada kisaran 6,50–8,54. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan komposisi *fly ash* efektif meningkatkan kapasitas penetralan batuan PAF dan menghambat pembentukan air asam selama proses pelindian.



Tabel 8. Pengukuran pH uji kinetik FDCLT

No.	Jenis Sample	Pengukuran pH									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		6-Oct	12-Oct	18-Oct	24-Oct	30-Oct	5-Nov	11-Nov	17-Nov	23-Nov	29-Nov
1	K. PK	2,03	1,98	2,01	2,14	1,87	1,8	1,69	2,11	2,21	2,13
2	K. PH	2,11	2,2	1,97	2,01	1,96	1,75	1,73	2,11	2,23	2,11
3	K. FA (FDCLT)	6,58	8,07	10,21	10,23	10,38	10,26	10,30	10,11	11,04	10,40
4	PK + FA (5 %)	3,68	3,32	3,12	2,92	2,78	2,77	2,52	2,99	2,96	2,76
5	PK + FA (10 %)	3,2	4,32	5,69	5,05	6,04	5,57	5,60	6,09	5,26	4,88
6	PK + FA (20 %) FDCLT	2,91	4,55	6,98	6,46	7,11	6,9	6,83	7,51	7,28	7,5
7	PH + FA (5%)	3,3	3,39	3,21	3,03	2,77	2,67	2,63	2,97	3,01	2,90
8	PH + FA (10%)	6,75	4,47	5,41	5,14	5,22	5,12	4,92	5,32	5,06	5,5
9	PH + FA (20%) FDCLT	6,5	7,6	8,28	8,12	8,06	8,4	7,95	8,54	8,53	8,44

Berdasarkan Tabel 9, hasil pengukuran *Total Dissolved Solids* (TDS) selama uji kinetik *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) menunjukkan bahwa sampel kontrol tanpa penambahan *fly ash* memiliki nilai TDS yang relatif tinggi, yaitu berkisar 8.380–14.400 ppm pada batuan PAF dan 7.860–13.800 ppm pada batuan PH. Penambahan *fly ash* menyebabkan penurunan nilai TDS secara bertahap selama periode pengujian. Pada komposisi *fly ash* 20%, nilai TDS menurun hingga 4.260–8.390 ppm untuk sampel PAF dan 3.830–12.800 ppm untuk sampel PH. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan komposisi *fly ash* mampu mengurangi konsentrasi padatan terlarut dalam air lindian, sehingga mengindikasikan efektivitas *fly ash* dalam menekan pelindian unsur-unsur terlarut selama proses oksidasi batuan.

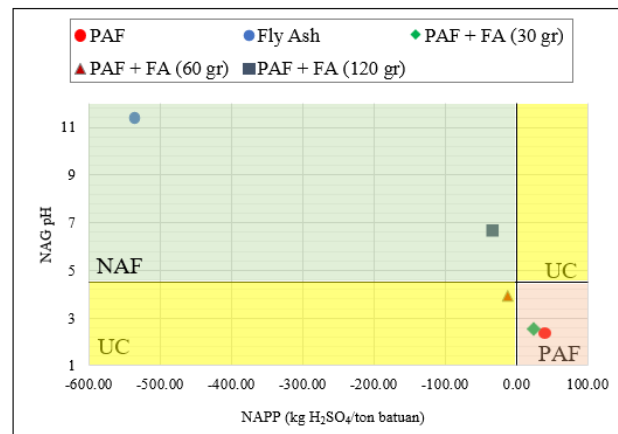
Tabel 9. Pengukuran TDS uji kinetik FDCLT

No.	Jenis Sample	Pengukuran <i>Total Dissolved Solid</i> (ppm)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		6-Oct	12-Oct	18-Oct	24-Oct	30-Oct	5-Nov	11-Nov	17-Nov	23-Nov	29-Nov
1	K. PK	12800	17500	11000	7950	10000	13600	14400	10800	8590	8380
2	K. PH	9180	8180	11200	8520	7860	13000	13800	11900	8530	10900
3	K. FA (FDCLT)	1003	702	1180	1040	1140	949	1160	670	828	739
4	PK + FA (5 %)	12800	14500	9920	6440	6730	6570	6080	5560	5460	5170
5	PK + FA (10 %)	7760	20300	10200	7270	6580	6480	5740	4400	3960	3880
6	PK + FA (20 %) FDCLT	5060	8390	7680	5330	5730	5770	5100	4330	4330	4260
7	PH + FA (5%)	30800	10500	8940	3860	5650	6290	5200	4760	4200	4310
8	PH + FA (10%)	21200	12500	11500	6440	5430	5430	5330	4240	3910	3790
9	PH + FA (20%) FDCLT	27700	12800	8210	5770	5400	5480	5030	4660	4260	3830



Analisis Statik Sampel

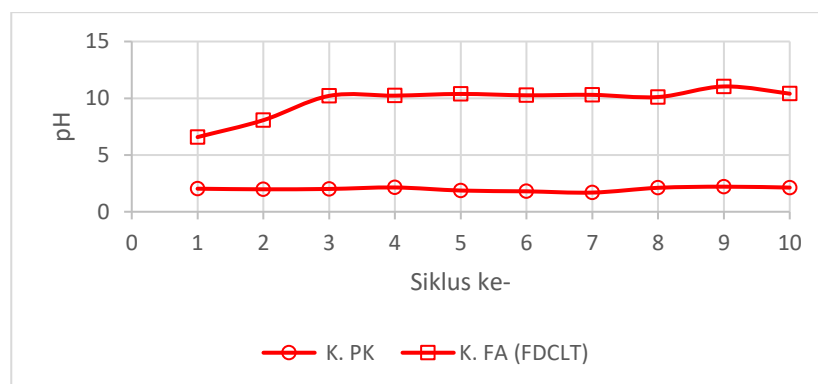
Berdasarkan kriteria penapisan menunjukan sampel yang tergolong PAF pada sampel PAF dan PAF-FA (5%), yang tergolong NAF pada sampel *Fly Ash* dan PAF-FA (20%), Serta Uncertain pada sampel PAF-FA (10%).



Gambar 5. Grafik hubungan NAPP vs NAG pH sampel PAF dan *fly ash* (AMIRA P387A,2002)

Analisis kinetik sampel

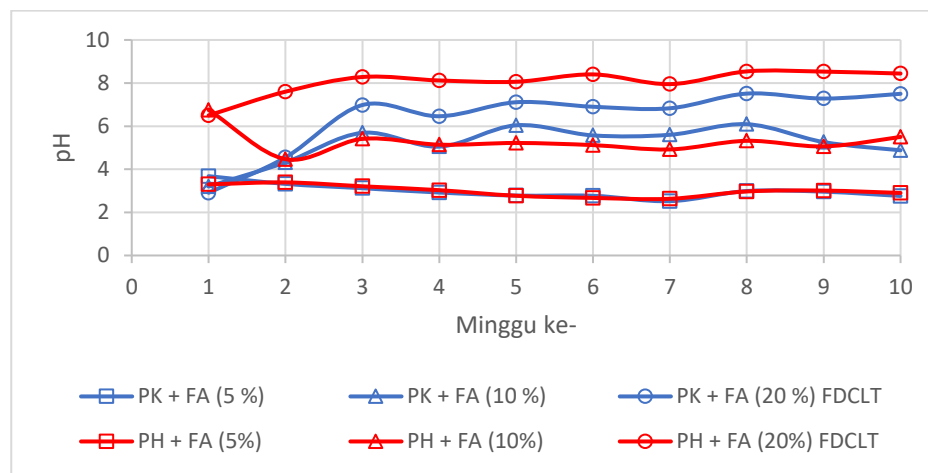
Berdasarkan Gambar 6, grafik pH selama uji kinetik *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) menunjukkan perbedaan yang jelas antara sampel kontrol (K. PK) dan sampel kontrol dengan *fly ash* (K. FA). Nilai pH pada sampel K. PK relatif stabil pada kondisi sangat asam, yaitu sekitar 1,7–2,1 selama 10 siklus pengujian. Sebaliknya, sampel K. FA mengalami peningkatan pH yang signifikan sejak siklus awal hingga mencapai kisaran 10–11 dan tetap stabil pada siklus berikutnya. Hasil ini menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki kapasitas netralisasi yang efektif dalam meningkatkan pH air lindian dan menghambat pembentukan kondisi asam selama proses pelindian.



Gambar 6. Grafik pH kolom kontrol FDCLT

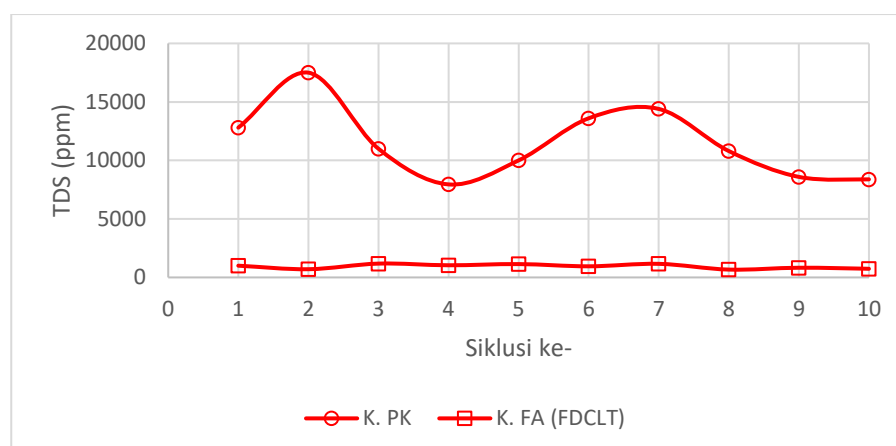


Berdasarkan Gambar 7, penambahan *fly ash* pada batuan PAF (PK) dan PH meningkatkan nilai pH air lindian selama uji kinetik FDCLT. Peningkatan pH seiring dengan bertambahnya komposisi *fly ash*, di mana penambahan 20% menghasilkan pH tertinggi dan relatif stabil pada kisaran netral hingga basa lemah. Sementara itu, komposisi 5% dan 10% menunjukkan peningkatan pH yang lebih rendah, terutama pada sampel PAF. Hasil ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi komposisi *fly ash*, semakin besar kapasitas netralisasinya dalam mengendalikan pembentukan air asam tambang selama proses pelindian.

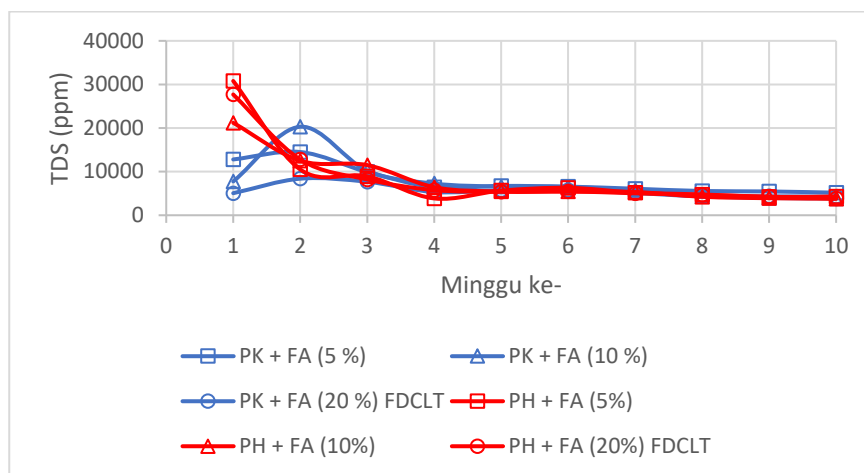


Gambar 7. Grafik pH PK-FA dan PH-FA FDCLT

Berdasarkan Gambar 8, nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) pada sampel kontrol batuan PAF (K. PK) cenderung berfluktuasi dengan konsentrasi yang relatif tinggi selama uji kinetik FDCLT. Sebaliknya, sampel kontrol dengan penambahan *fly ash* (K. FA) menunjukkan nilai TDS yang jauh lebih rendah dan relatif stabil pada setiap siklus pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* efektif menurunkan konsentrasi padatan terlarut dalam air lindian, sehingga berpotensi mengurangi pelindian unsur-unsur terlarut selama proses pembentukan air asam tambang.



Gambar 8. Grafik TDS kolom kontrol FDCLT



Gambar 9. Grafik TDS PK-FA dan PH-FA FDCLT

Berdasarkan Gambar 9, nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) pada sampel PAF (PK) dan PH mengalami penurunan selama uji kinetik FDCLT setelah penambahan *fly ash*. Penurunan TDS semakin nyata dengan meningkatnya komposisi *fly ash*, terutama pada penambahan 20%, yang menghasilkan nilai TDS lebih rendah dan relatif stabil dibandingkan komposisi 5% dan 10%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan komposisi *fly ash* efektif mengurangi konsentrasi padatan terlarut dalam air lindian, sehingga berpotensi menekan pelindian unsur-unsur terlarut selama proses pembentukan air asam tambang.

Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kualitas Air Lindian

Uji FDCLT, volume air lindian yang berkisar 60–80% menunjukkan bahwa sebagian air tetap tertahan dalam pori batuan, sehingga kondisi sampel berada pada tingkat kejenuhan tinggi. Keberadaan air ini menghambat masuknya oksigen ke dalam pori-pori sampel, sehingga proses oksidasi mineral sulfida—terutama pirit—menjadi kurang optimal. Akibatnya, pelapukan pirit berkurang. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa semakin besar jumlah air lindian yang keluar, semakin rendah pH yang dihasilkan, karena semakin sedikit air dalam kolom yang mampu menahan dan membatasi difusi oksigen ke dalam material.

Pengaruh Penambahan *Fly Ash* Terhadap Kualitas Air Lindian

Penambahan *fly ash* terbukti menurunkan nilai NAPP, yang berarti komponen penetral asam dalam campuran semakin dominan dibanding komponen pembentuk asam. Hasil uji kinetik FDCLT menunjukkan bahwa semakin besar proporsi *fly ash*, nilai pH air lindian meningkat dan TDS cenderung lebih rendah. Partikel halus *fly ash* mampu mengisi pori-pori material PAF sehingga memperkecil luas permukaan reaksi antara oksigen, mineral sulfida, dan air. Kondisi ini menekan proses oksidasi pirit dan meningkatkan kapasitas netralisasi. Secara keseluruhan, peningkatan rasio *fly ash* dalam campuran menghasilkan air lindian dengan pH lebih tinggi, menandakan efektivitas *fly ash* dalam mencegah pembentukan air asam tambang.



KESIMPULAN

Hasil penelitian pengaruh *penambahan fly ash* terhadap batuan *Potential Acid Forming* menunjukkan bahwa: Penambahan *fly ash* dalam campuran PAF terbukti meningkatkan kemampuan netralisasi asam dengan menurunkan nilai NAPP dan menghasilkan pH air lindian yang lebih tinggi. *Fly ash* yang berukuran halus mengisi pori-pori material PAF sehingga mempersempit ruang reaksi oksidasi pirit dan menekan pembentukan asam. Hasil uji FDCLT menunjukkan bahwa semakin besar rasio *fly ash*, kualitas air lindian semakin baik dan proses pembentukan AAT dapat diminimalkan, menegaskan efektivitas *fly ash* sebagai material penetral dalam campuran. Pencampuran material PAF (PAF kasar maupun PAF Halus) dan *fly ash* pada metode uji kinetik FDCLT dengan *ratio* FA 20% hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan material penetral tertentu terbukti efektif dalam mencegah terbentuknya air asam tambang yang ditunjukkan dengan nilai pH yang stabil dalam waktu 10 minggu pengujian dengan rentang pH 6,5-8,7.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh civitas akademika Universitas Halu Oleo atas dukungannya dalam proses penelitian ini hingga dapat diselesaikan dengan baik sesuai harapan.

PUSTAKA

- Dewandari, Y. K. W. (2019): *Studi Karakterisasi Material Campuran Batuan Potential Acid Forming dan Abu Terbang Dalam Pengelolaan Air Asam Tambang Pada Skala Laboratorium*. Tugas Akhir. ITB. Bandung.
- Firman. (2017): *Kajian Pencampuran Abu Batubara Limbah PLTU Dengan Material Pembentuk Asam Untuk Pencegahan Air Asam Tambang*. Tesis. ITB. Bandung.
- Sondakh, G. T. (2017). Studi Pemanfaatan Abu Batubara Sebagai Material Pelapis (Cover Layering) Untuk Mencegah Terbentuknya AAT di Wilayah Perambangan Batubara PT. Adaro Indonesia. Bandung, Indonesia: Institut Teknologi Bandung.
- Qureshi, A., Jia, Y., Maurice, C., & Öhlander, B. (2016). *Potential of fly ash for neutralisation of acid mine drainage*. Environmental Science and Pollution Research, 23 (17), 17083–17094.
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M., & Mamba, B. B. (2017). *Evaluation of waste materials for acid mine drainage remediation*. Fuel, 188, 294–309.
- Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B. G. (2018). *A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices*. Minerals Engineering.
- Nordstrom, D. K. (2019). Acid rock drainage and climate change. Journal of Geochemical Exploration.
- Shirin, S., Jamal, A., Emmanouil, C., & Yadav, A. K. (2021). *Assessment of characteristics of acid mine drainage treated with fly ash*. Applied Sciences, 11(9), 3910.
- Moersidik, S. S., Yulianita, N. E., Hasanah, S. U., Hidayat, A. E., Pratama, M. A., & Priadi, C. R. (2022). *The performance of fly ash-based coagulants to remove heavy metals from acid mine drainage*. Rasayan Journal of Chemistry, 15(3), 2016–2025.
- Abfertiawan, M. S., Kautsar, M. D., Hasan, F., Palinggi, Y., & Pranoto, K. (2024). *The application of artificial neural network model to predicting acid mine drainage from long-term lab-scale kinetic test*. arXiv.



- Nurlela, Agustina, T. E., Arita, S., Bahrin, D., & Gayatri, R. (2025). *Fly ash adsorbent for pH improvement and manganese reduction in acid mine drainage*. Journal of Applied Materials and Technology, 7 (1), 41–48.
- Qian, J., Zhou, L., Zhang, J., Zhang, K., & Zhu, X. (2026). *The removal effects and mechanism of sulfate from acid mine drainage using fly ash and sunflower heads composite biochar*. Environmental Geochemistry and Health.
- Deng, S., Yin, W., Li, Q., Zhang, Y., Jin, H., Yu, H., & Wang, T. (2026). *Fly ash-mediated simultaneous pH regulation and heavy metal elimination for application of low-intensity acid mine drainage in active coal mines: A comparative study of fly ash from four coal-fired power plants*. Frontiers in Ecology and Evolution, 14.
- Sustainable remediation of acid mine drainage using coal fly ash: A comprehensive review and bibliometric analysis*. (2026). Chemical Engineering Journal Advances, 25, 101047.
- Kahfi, M. N., & Abubakar. (2026). *Technical evaluation of fly ash and bottom ash (FABA) utilization for acid mine drainage mitigation in coal mining operations*. Journal of Technology and Policy in Energy and Electric Power.