

PENGARUH *FLY ASH* SEBAGAI MATERIAL PENUTUP TERHADAP LAJU OKSIDASI PIRIT PADA SKENARIO PERLAPISAN DENGAN PENDEKATAN UJI KINETIK DAN PEMODELAN GEOKIMIA

S.D. Komari^{1*}, Lusitania¹, A.M.M. Rus¹, dan P.D. Afifah¹

¹Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: sridesdita@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK: Kegiatan penambangan batubara merupakan salah satu penyebab terpaparnya sulfur dan mineral sulfida (*pyrite*), sehingga terjadi kontak langsung dengan udara bebas yang selanjutnya terjadi pelarutan akibat adanya air dan membentuk Air Asam Tambang (AAT). Proses ini menghasilkan air dengan pH rendah serta kandungan ion Fe dan sulfat tinggi, sehingga berdampak negatif terhadap kualitas lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh *fly ash* (FA) terhadap laju oksidasi pirit pada material *Potentially Acid Forming* (PAF). Metode yang digunakan adalah kombinasi uji kinetik *Free Draining Column Leach Test* (FDCLT) dan permodelan geokimia dengan *software PHREEQC*. Laju oksidasi ditentukan berdasarkan perhitungan mol Fe dan mol SO₄ dalam air lindian. Hasil menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dapat menurunkan laju oksidasi pirit secara signifikan. Penambahan *fly ash* menurunkan laju oksidasi pirit, dengan Model B ($1,43 \times 10^{-9}$ – $3,69 \times 10^{-10}$) jauh lebih rendah dari Model A ($6,09 \times 10^{-6}$ – $9,22 \times 10^{-7}$), serta meningkatkan pH sehingga pengendalian oksidasi lebih efektif. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan konsentrasi Fe terlarut dan sulfat pada kolom PAF-FA dibanding PAF murni. Analisis rasio Fe-SO₄ juga mendukung bahwa reaksi oksidasi pirit lebih terkontrol pada skenario perlapisan. Dengan demikian, *fly ash* berpotensi digunakan sebagai material penutup yang efektif untuk pengendalian Air Asam Tambang.

Kata Kunci: Air Asam Tambang, *Fly Ash*, Pyrite, FDCLT, Laju Oksidasi

ABSTRACT: Coal mining exposes sulfur and pyrite, to atmospheric oxygen, which in the presence of water, leads to dissolution processes that generate Acid Mine Drainage (AMD). AMD is characterized by low pH and high concentrations of Fe and SO₄ ions, resulting in significant environmental impacts. This study evaluates the influence of fly ash (FA) addition on the oxidation rate of pyrite in Potentially Acid Forming (PAF) material. The research employed a combination of kinetic testing using the Free Draining Column Leach Test (FDCLT) and geochemical modeling with PHREEQC. The oxidation rate was quantified through molar calculations of Fe and SO₄ in the leachate. The addition of fly ash reduces the pyrite oxidation rate, with Model B (1.43×10^{-9} – 3.69×10^{-10}) being substantially lower than Model A (6.09×10^{-6} – 9.22×10^{-7}), while also increasing pH, thereby enhancing oxidation control. The results indicated a decrease in the concentration of dissolved Fe and sulfate in the PAF-FA column compared to pure PAF. Analysis of the Fe–SO₄ ratio further indicates that pyrite oxidation is more effectively controlled in the layered scenario. In conclusion, fly ash demonstrates considerable potential as an effective cover material for preventing Acid Mine Drainage.

Keywords: Acid Mine Drainage, Fly ash, Pyrite, FDCLT, Oxidation Rate.

1. Pendahuluan

Kegiatan penambangan batubara dan pengupasan *overburden* merupakan salah satu penyebab terpaparnya sulfur dan mineral sulfida (*pyrite*), sehingga terjadi kontak

langsung dengan udara bebas yang selanjutnya terjadi pelarutan akibat adanya air dan membentuk Air Asam Tambang (AAT).

Air asam tambang terjadi karena adanya proses oksidasi batuan mengandung mineral sulfida (FeS₂), air

dan udara [2]. Proses utama yang menyebabkan terbentuknya AAT adalah oksidasi mineral sulfida dan dilanjutkan dengan penguraian serta transpor dari unsur-unsur yang dapat berbahaya bagi lingkungan seperti logam berat.

Metode Enkapsulasi serta Perlapisan digunakan untuk mengendalikan Air Asam Tambang dengan menempatkan batuan *Potentially Acid Forming* (PAF) dan *Non Acid Forming* (NAF) secara berlapis agar kontak antara oksigen dan air dapat dikurangi. Metode *dry cover* adalah salah satu bagian dari metode Perlapisan. *Fly ash* merupakan salah satu material *non acid forming* (NAF) yang umum digunakan dalam metode *dry cover*. Upaya metode perlapisan menggunakan material NAF bertujuan untuk meminimalkan difusi oksigen serta infiltrasi air ke *waste rocks*, sehingga memperlambat oksidasi sulfida [6].

Efektivitas dari metode perlapisan ini dipengaruhi oleh ketersediaan batuan, perbandingan antara batuan PAF dan NAF, jenis reaktivitas dari batuan pengonsumsi asam, keberadaan dan muatan kimiawi dari material alkalin. Laju oksidasi adalah kecepatan interaksi antara molekul oksigen dan semua zat yang berbeda. Faktor utama yang mempengaruhi laju oksidasi sulfida adalah mineral sulfida, lingkungan ambien, dan unsur atau zat pengoksidasi [3].

Beberapa penelitian mendukung efektivitas dari penggunaan *fly ash* sebagai material penutup dalam salah satu metode pengendalian Air Asam Tambang. Penelitian yang dilakukan oleh Win et al. (2020) menunjukkan jika *fly ash* (FA) digunakan sebagai material tambahan dalam salah satu sistem pengendalian AAT yaitu sistem *dry cover*. *Fly Ash* adalah salah satu produk sisa pembakaran batubara yang mengandung mineral basa seperti CaO dan dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) yang berfungsi untuk menetralkan asam serta meningkatkan alkalinitas air lindian [7].

Pemanfaatan *fly ash* sebagai material penutup tambang tidak hanya mengurangi volume limbah industri, tetapi memberikan solusi dalam proses kegiatan reklamasi tambang dan perbaikan lingkungan. Fly ash mengandung oksida basa (CaO, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃) yang dapat berfungsi menetralkan keasaman serta mengikat ion logam berat melalui proses presipitasi dan adsorpsi [5].

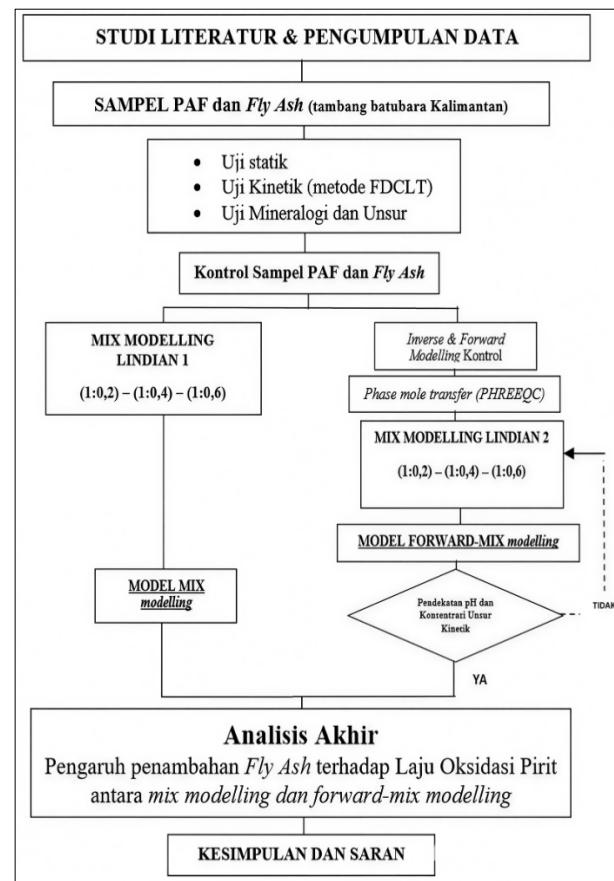
Hipotesis penelitian ini adalah bahwa penambahan fly ash pada material PAF dapat menurunkan laju oksidasi pirit secara signifikan melalui mekanisme peningkatan pH,

pengendapan mineral sekunder (Fe(OH)_3 , jarosit), dan pengurangan mobilitas Fe serta sulfat. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan material *fly ash* terhadap laju oksidasi pirit pada material PAF dengan pendekatan uji kinetik serta pemodelan geokimia menggunakan *software* PHREEQC.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini (Gambar 1) terdiri dari beberapa macam metode yang digunakan, yaitu:

- 1) Studi Literatur
Berdasarkan referensi penelitian sebelumnya mengenai Permodelan Geokimia dan Skenario perlapisan pada Pengelolaan Air Asam Tambang, jurnal yang terkait, dan buku mengenai Pengelolaan Air Asam Tambang.
- 2) Pengolahan Data dan Analisis Data
- 3) Pengolahan Data pada penelitian ialah melakukan perhitungan terhadap data dengan menggunakan *Microsoft excel* dan perhitungan kualitas air lindian dengan *software* PHREEQC (database minteqv4).



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

3. Pengolahan Data

Data uji kinetik dan air lindian diperoleh dari hasil pengujian kolom (FDCLT) terhadap material PAF dan *fly ash* asal tambang batubara di Kalimantan Selatan, yang kemudian digunakan sebagai dasar input dari pemodelan geokimia PHREEQC. Pengambilan sampel air lindian kemudian diolah dengan metode *Free Draining Leach Column Test (FDCLT)*. FDCLT dilakukan pengambilan sample secara harian hingga hari ke-28 untuk merepresentasikan fase awal oksidasi pirit yang berlangsung cepat, dan setelah dilakukan proses "harian", akan diambil sample untuk setiap tiga hari hingga hari ke-58 untuk menggambarkan fase stabilisasi ketika laju reaksi mulai menurun akibat terbentuknya lapisan pasif mineral sekunder.

Data tersebut kemudian diolah menggunakan *software* PHREEQC, tabulasi, dan grafik. Melalui pemodelan ini didapatkan transfer mol, pH, serta kandungan unsur utama dari setiap skenario perlapisan. Pemodelan ini didasarkan pada hasil uji kinetik dan data mineralogi untuk mengevaluasi penambahan *fly ash* terhadap laju oksidasi pirit.

Pemodelan geokimia ini menggunakan dua pendekatan yaitu Model A (*mix modelling*) dan Model B (*forward-mix modelling*). Model A merepresentasikan pencampuran (*mix*) awal antara hasil lindian material PAF dan *fly ash* tanpa memperhitungkan reaksi lanjutan, sehingga mencerminkan kondisi sistem di awal. Model B memodelkan terjadinya reaksi sekunder seperti presipitasi dan pelarutan mineral sekunder setelah pencampuran (*mix*) antar air lindian PAF dan *fly ash*. Perbandingan kedua model ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil simulasi dengan data uji kinetik serta memahami bagaimana *fly ash* dapat mengontrol laju oksidasi pirit.

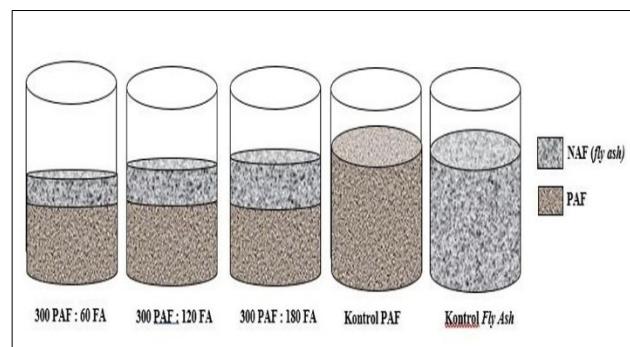
4. Hasil dan Pembahasan

Hasil uji kinetik dan pemodelan geokimia digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *fly ash* terhadap laju oksidasi pirit. Untuk memahami mekanisme tersebut, analisis dilakukan terhadap perubahan pH dan kualitas air lindian, hasil pemodelan skenario perlapisan menggunakan PHREEQC, serta analisis laju oksidasi pirit pada berbagai variasi campuran PAF dan *fly ash*.

4.1. Pengaruh Fly Ash terhadap Kualitas Air Lindian dan pH

Hasil pengujian kinetik menunjukkan adanya peningkatan pH serta penurunan kadar Fe dan SO_4^{2-} dengan bertambahnya proporsi *fly ash* dalam skenario perlapisan. Pada kolom kontrol (PAF murni), pH AAT tetap dalam rentang asam (pH 2–3), sedangkan pada kolom yang mengandung *fly ash*, pH naik hingga mencapai 6–7 setelah masa pengujian selama 60 hari. Penurunan konsentrasi ion Fe dan SO_4^{2-} mengindikasikan jika *fly ash* dapat menekan laju oksidasi pirit. Proses neutralisasi yang terjadi disebabkan oleh pelarutan oksida basa dari *fly ash*, seperti CaO dan MgO, yang menghasilkan ion hidroksida (OH^-) dan meningkatkan pH air lindian. Dalam kondisi tersebut, ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} yang dihasilkan dari oksidasi pirit akan mengalami pengendapan dan membentuk Fe(OH)_3 atau mineral sekunder seperti jarosit dan ferrihidrit [5].

Selain itu, peningkatan pH juga menyebabkan penurunan tingkat kelarutan logam berat lain (Mn, Zn, Cu, Pb), sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Win et al. [7] yang menyatakan jika *fly ash* meningkatkan pH dalam skenario perlapisan serta mengurangi konsentrasi ion logam terlarut secara signifikan.



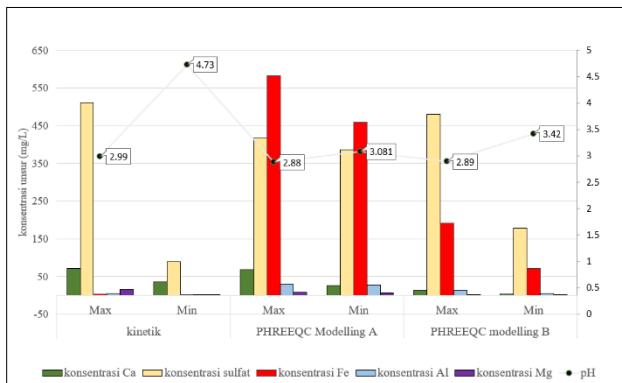
Gambar 2. Ilustrasi Skenario Perlapisan

Pada Gambar 2, mengilustrasikan secara umum salah satu metode pengendalian AAT yaitu sebuah skenario perlapisan dalam skala laboratorium.

4.2. Skenario Perlapisan dengan menggunakan PHREEQC

PHREEQC digunakan untuk pemodelan skenario pelapisan dengan pendekatan *inverse*, *forward*, dan *mix modelling* untuk membandingkan hasil simulasi kimia, khususnya nilai pH. Simulasi terdiri atas dua tahap, yaitu inverse modelling yang kemudian diverifikasi melalui pendekatan *forward* dan *mix modelling* pada dua skenario, yakni kondisi *mix modelling* dan kondisi *forward-mix modelling*.

Berdasarkan hasil skenario pelapisan dari uji kinetik, pemodelan Model A dan Model B menunjukkan bahwa variasi kolom PAF-FA menghasilkan pH air lindian, dengan Ilustrasi Skenario Perlapisan pada Gambar 2, dimana kolom pertama dengan perbandingan PAF 300 g + FA 60 g menghasilkan pH 2,8 sampai dengan 4,73, kolom kedua dengan perbandingan PAF 300 g + FA 120 g menghasilkan pH 2,9 sampai dengan 3,3, dan kolom ketiga dengan perbandingan PAF 300 g + FA 180 g menghasilkan pH 3 sampai dengan 4,6. Pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa nilai pH dari seluruh pendekatan masih <5, sehingga air lindian tetap bersifat asam. Grafik konsentrasi Unsur mengindikasikan bahwa semakin rendah pH maka semakin tinggi konsentrasi logam terlarut. Konsentrasi Fe pada *mix modelling* tetap tinggi (583–459 mg/L) dan tidak berbeda signifikan dari kontrol PAF (459,69 mg/L), sehingga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan.



Gambar 3. Perbandingan Konsentrasi Unsur Utama dan Nilai pH antara Hasil Uji Kinetik dan Pemodelan Geokimia (PHREEQC).

Hasil simulasi PHREEQC divalidasi dengan membandingkan nilai pH dan konsentrasi Fe-SO₄ hasil pemodelan dengan data uji kinetik FDCLT. Kesesuaian tren antara hasil model A dan B dengan data eksperimen menunjukkan bahwa model yang digunakan mampu merepresentasikan proses geokimia yang terjadi.

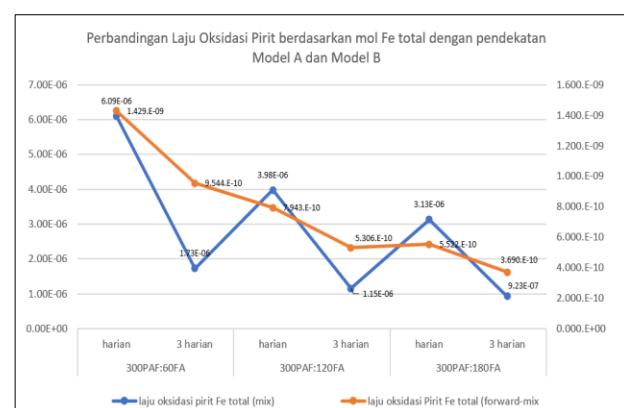
4.3. Analisis Laju Oksidasi Pirit

Laju oksidasi pirit dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi mol Fe dan SO₄²⁻ dalam air lindian terhadap waktu pengamatan. Kedua parameter tersebut dipilih karena hasil utama dari reaksi oksidasi pirit (FeS₂), sehingga dapat merepresentasikan tingkat aktivitas oksidasi yang terjadi. Laju oksidasi (*r*) dihitung dari perbandingan perubahan jumlah mol (Δn) terhadap interval waktu (Δt) dalam satuan detik (mol L⁻¹ s⁻¹).

Hasil dari Pemodelan Geokimia dengan *software* PHREEQC Model A dan Model B digunakan untuk mengidentifikasi tren dari laju oksidasi pirit pada setiap skenario perlapisan. Pada Tabel 1 menunjukkan jika penambahan *fly ash* dapat menurunkan konsentrasi Fe dan SO₄²⁻ terlarut secara signifikan yang mengindikasikan bahwa reaksi oksidasi pirit lebih terkontrol. Maka dari itu, hasil tersebut menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki efektivitas memperlambat laju oksidasi melalui peningkatan pH, pembentukan lapisan penutup dari Fe(OH)₃, serta pengendapan mineral sekunder.

Tabel 1. Laju Oksidasi Pirit

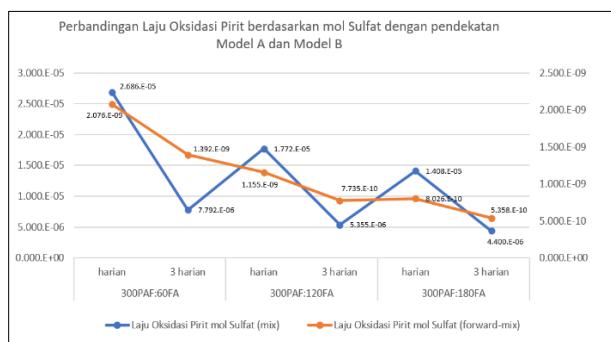
Model PHREEQC	Laju Oksidasi (mol L ⁻¹ s ⁻¹)	
	mol Fe total	mol Sulfat total
<i>Model A</i>	6,091E-06 – 9,226E-07	2,686E-05 – 4,400E-06
	1,429E-09 – 3,690E-10	2,076E-09 – 5,358E-10
<i>Model B</i>		



Gambar 4. Perbandingan Laju Oksidasi Pirit berdasarkan Mol Fe antara Model A dan Model B

Pada Gambar 4 memperlihatkan jika laju oksidasi pirit berdasarkan total mol Fe pada Model B jauh lebih kecil daripada Model A, dengan adanya penurunan hingga dua

sampai tiga orde besarnya (dari 10^{-6} ke 10^{-9} mol L $^{-1}$ s $^{-1}$). Tren ini menunjukkan jika oksidasi pirit lebih terkontrol karena pH yang naik dan pembentukan mineral sekunder Fe(OH) $_3$, yang menghalangi pelepasan Fe terlarut.



Gambar 5. Perbandingan Laju Oksidasi Pirit berdasarkan Mol Sulfat antara Model A dan Model B

Pada Gambar 5 memperlihatkan laju oksidasi pirit berdasarkan mol sulfat, Model B yang menghasilkan nilai lebih kecil daripada Model A. Penurunan ini memperlihatkan jika penambahan *fly ash* dapat menekan pelepasan sulfat dari oksidasi pirit melalui proses penetrasi serta adanya pembentukan mineral sekunder seperti gypsum serta Fe(OH) $_3$.

Perhitungan laju oksidasi pirit menunjukkan jika berdasarkan mol Fe, Model A (*mix modelling*) menghasilkan nilai $6,09 \times 10^{-6} - 9,22 \times 10^{-7}$ mol L $^{-1}$ s $^{-1}$, sedangkan Model B (*forward-mix modelling*) $1,43 \times 10^{-9} - 3,69 \times 10^{-9}$ mol L $^{-1}$ s $^{-1}$. Sementara itu, berdasarkan mol sulfat, *mix modelling* memberikan nilai $2,68 \times 10^{-5} - 4,4 \times 10^{-5}$ mol L $^{-1}$ s $^{-1}$ dan *forward-mix modelling* $2,08 \times 10^{-9} - 5,36 \times 10^{-10}$ mol L $^{-1}$ s $^{-1}$.

Berdasarkan hasil perhitungan laju oksidasi, dapat disimpulkan bahwa perbandingan rasio PAF dan *fly ash* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap laju oksidasi pirit. Untuk memahami lebih lanjut mekanisme reaksi yang terjadi serta hubungannya dengan hasil pemodelan geokimia, dilakukan analisis lebih detail yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.4. Pengaruh Penambahan Fly Ash terhadap Laju Oksidasi Pirit

Penambahan *fly ash* ke dalam material *Potentially Acid Forming* (PAF) memberikan dampak signifikan pada pengurangan laju oksidasi pirit. Berdasarkan perhitungan hasil laju oksidasi, nilai laju oksidasi pirit pada Model B

(*Forward-Mix Modelling*) menunjukkan adanya penurunan hingga dua orde dibandingkan Model A (*Mix Modelling*), yaitu dari rentang $10^{-7}-10^{-8}$ mol L $^{-1}$ s $^{-1}$ menjadi $10^{-9}-10^{-10}$ mol L $^{-1}$ s $^{-1}$. Nilai tersebut menunjukkan kesesuaian dengan rentang nilai yang dinyatakan oleh Evangelou [1] dan Gautama [3] untuk sistem air asam tambang dalam kondisi terkontrol.

Penurunan laju oksidasi pirit ini mengindikasikan bahwa *fly ash* memiliki efektivitas tinggi dalam memperlambat proses oksidasi mineral sulfida. Efektivitas tersebut berasal dari kandungan oksida basa seperti CaO dan MgO dalam *fly ash* yang dapat menaikkan nilai pH sehingga menurunkan kelarutan Fe $^{2+}$ serta memperlambat reaksi oksidasi selanjutnya.

Hasil pemodelan geokimia dengan *software* PHREEQC juga mengindikasikan terjadinya presipitasi mineral sekunder seperti Fe(OH) $_3$, jarosit, dan gypsum pada kondisi pH netral hingga sedikit basa. Pembentukan mineral ini memiliki peran dalam menurunkan aktivitas ion Fe $^{2+}$ pada larutan serta mengurangi mobilitas ion sulfat. Dengan demikian, penerapan perlapisan dengan *fly ash* tidak hanya berperan sebagai material penutup fisik, tetapi juga sebagai pengendali kimia yang menstabilkan lingkungan reaksi.

Analisis rasio Fe–SO $_4$ juga menunjukkan penambahan *fly ash* menyebabkan terjadinya penurunan rasio Fe–SO $_4$. Hal tersebut terjadi menandakan adanya presipitasi Fe menjadi mineral sekunder seperti Fe(OH) $_3$ serta adanya perlambatan dari reaksi oksidasi pirit. Hal tersebut sejalan dengan hasil studi yang dilakukan oleh Pérez-López et al. [4] yang mengatakan jika peningkatan pH dari penambahan *fly ash* dapat membentuk lapisan pasif Fe(OH) $_3$ di permukaan pirit sehingga memperlambat reaksi laju oksidasi. Kondisi tersebut menyebutkan untuk rasio Fe–SO $_4 < 0,5$ pada skenario perlapisan dengan *fly ash*, menunjukkan bahwa sebagian besar Fe telah terpresipitasi dan reaksi oksidasi berlangsung lebih terkontrol. Hal ini konsisten dengan peningkatan pH serta menunjukkan pengaruh dari *fly ash* dalam menetralkan dan menghambat pembentukan AAT [3].

Dengan demikian, hasil penelitian ini menyatakan bahwa *fly ash* berpotensi sebagai salah satu material penutup pengendali laju oksidasi pirit dalam pengendalian Air Asam Tambang (AAT).

5. Kesimpulan

Penambahan *fly ash* sebagai material penutup mampu menurunkan laju oksidasi pirit pada skenario perlapisan. Hasil uji kinetik dan pemodelan geokimia menunjukkan adanya peningkatan pH serta penurunan konsentrasi Fe dan SO_4^{2-} pada kolom skenario dibandingkan PAF murni. Nilai laju oksidasi pada kolom skenario juga lebih rendah satu hingga dua orde, menandakan bahwa *fly ash* efektif memperlambat proses oksidasi. Penurunan tingkat oksidasi hingga dua orde menunjukkan bahwa *fly ash* berperan penting dalam menetralkan kondisi lingkungan, dengan cara membentuk lapisan dari mineral sekunder seperti Fe(OH)_3 , yang pada akhirnya mencegah oksidasi pirit. Dengan demikian, *fly ash* berpotensi digunakan sebagai material penutup untuk membantu pengendalian AAT.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing, rekan-rekan, serta semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi selama pelaksanaan penelitian ini. Semoga segala usaha yang telah dilakukan menjadi langkah awal menuju perjalanan akademik dan profesional yang lebih baik ke depannya.

Daftar Pustaka

- [1] V. P. Evangelou, *Pyrite Oxidation and Its Control*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.
- [2] R. S. Gautama, *Pengelolaan Air Asam Tambang*. Bandung: ITB Press, 2012.
- [3] R. S. Gautama, *Pembentukan, Pengendalian dan Pengolahan Air Asam Tambang*. Bandung: ITB Press, 2014.
- [4] R. Pérez-López, J. M. Nieto, and G. Ruiz de Almodóvar, “Utilization of fly ash to improve the quality of the acid mine drainage generated by oxidation of a sulfide-rich mining waste: Column experiments,” *Chemosphere*, vol. 67, no. 8, pp. 1637–1646, 2007, doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.10.009.
- [5] W. M. Gitari, L. F. Petrik, O. Etchebers, D. L. Key, E. Iwuoha, and C. Okujeni, “Treatment of acid mine drainage with coal fly ash: Exploring the solution chemistry and product water quality,” in *Coal Combustion Products: A Global Perspective*, IntechOpen, 2008, pp. 1–20.
- [6] S. Matsumoto, H. Ishimatsu, H. Shimada, T. Sasaoka, G. J. Kusuma, and R. S. Gautama, “Placement of waste

dump for prevention of acid mine drainage (AMD) by cover system in open cast coal mine: Effects of water quality on AMD,” *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2017.

- [7] T. S. Win, S. Dwiki, A. Hamanaka, T. Sasaoka, H. Shimada, S. Matsumoto, and G. J. Kusuma, “Application of fly ash and organic material as a dry cover system in the prevention of acid mine drainage generation,” *Journal of Geoscience and Environment Protection*, vol. 8, no. 5, pp. 56–64, 2020, doi: 10.4236/gep.2020.85004.