



KARAKTERISTIK PEMBENTUKAN AIR ASAM TAMBANG PADA ENDAPAN HIGH SULPHIDATION EPITHERMAL

CHARACTERISTICS OF ACID MINE DRAINAGE FORMATION ON HIGH SULPHIDATION EPITHERMAL DEPOSITS

R. Prihartini^{1*}, R. Syaputra², G. J. Kusuma³

^{1,2}Magister Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung,

³Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung,

¹⁻³Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132, Telp. (022) 2506282, Fax. (022) 2514922

e-mail: *¹yanti.sintang@gmail.com, ²rizkysy1@gmail.com, ³jaluku@itb.ac.id

ABSTRAK

Kegiatan penambangan meliputi aktivitas penggalian dan penimbunan batuan sisa pada tambang emas dengan tipe endapan *high sulphidation epithermal* (HSE), memungkinkan terdedahnya material sulfida kontak dengan udara dan air berpotensi untuk menimbulkan air asam tambang (AAT). Tujuan penelitian untuk mengetahui studi pembentukan AAT dengan meninjau karakteristik laju oksidasi mineral sulfida dengan pendekatan mol besi total, mol sulfat, dan mol pirit dari hasil pemodelan geokimia PHREEQC. Sebanyak empat sampel batuan yang digunakan dan dikelompokkan berdasarkan domain geologi tingkat oksidasi sempurna (COX) dan tidak teroksidasi (UOX). Metode penelitian menggunakan uji mineralogi dan unsur, serta uji geokimia (statik dan kinetik). Pemodelan geokimia menggunakan PHREEQC dilakukan untuk mensimulasikan perubahan pH dan konsentrasi zat terlarut yang dihasilkan selama uji kinetik. Hasil air lindi memiliki pH relatif rendah yang diiringi oleh peningkatan konsentrasi sulfat, besi, aluminium, dan konstituen lainnya. Laju oksidasi pembentuk AAT berdasarkan mol sulfat ($1,172 \times 10^{-10} - 5,453 \times 10^{-10} \text{ mol/m}^2\text{s}$) lebih mendekati nilai transfer mol *pyrite* hasil pemodelan geokimia ($4,260 \times 10^{-11} - 5,561 \times 10^{-10} \text{ mol/m}^2\text{s}$), dibandingkan laju oksidasi mol besi total ($3,102 \times 10^{-18} - 9,090 \times 10^{-09} \text{ mol/m}^2\text{s}$). Kondisi ini disebabkan oleh kandungan besi dalam air lindi yang lebih banyak mengendap dibandingkan sulfat. Laju reaksi *pyrite* pada sampel COX jauh lebih rendah dari UOX, hal ini disebabkan oleh sampel COX yang lebih sedikit mengalami laju reaksi oksidasi dibandingkan UOX.

Kata kunci: air asam tambang, laju oksidasi, PHREEQC

ABSTRACT

Mining activities include extracting and stockpiling waste rock in gold mines with high sulphidation epithermal (HSE) deposits and exposing sulfide material in contact with air and water, which can potentially cause acid mine drainage (AMD). This research aims to determine the study of AMD formation by reviewing the characteristics of the rate of oxidation of sulfide minerals with the total moles of iron, sulfate moles, and pyrite approaches from the results of the PHREEQC geochemical modeling. A total of four rock samples were used and grouped according to geological domains of completely oxidized (COX) and un-oxidized (UOX) levels. The research method uses mineralogy, elemental tests, and geochemical tests (static and kinetic). Geochemical modeling using PHREEQC was carried out to simulate changes in pH and solute concentration produced during kinetic tests. The resulting leachate water has a relatively low pH, accompanied by an increase in the concentration of sulfate, iron, aluminum, and other constituents. The oxidation rate of AAT formation based on moles of sulfate ($1.172 \times 10^{-10} - 5.453 \times 10^{-10} \text{ mol/m}^2\text{s}$) is closer to the mole transfer value of pyrite from geochemical modeling ($4.260 \times 10^{-11} - 5.561 \times 10^{-10} \text{ mol/m}^2\text{s}$), compared to total mole oxidation rate of iron ($3.102 \times 10^{-18} - 9.090 \times 10^{-09} \text{ mol/m}^2\text{s}$). This condition is caused by the iron content in the leachate, which settles more than sulfate. The pyrite reaction rate in COX samples was much lower than UOX due to COX samples having less oxidation reaction rate than UOX.

Keywords: Acid Mine Drainage, Oxidation Rate, PHREEQC

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan memiliki hubungan langsung dengan makhluk hidup dan lingkungan sekitarnya, dengan prinsip kerja mengeksploitasi sumberdaya mineral secara langsung. Permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh kegiatan pertambangan adalah terbentuknya air asam tambang (AAT). AAT adalah air pada kegiatan penambangan yang bersifat asam dan terbentuk sebagai akibat teroksidasinya mineral sulfida disertai keberadaan air dan oksigen [1]. Terbentuknya AAT akan berdampak pada ekosistem, terutama mempengaruhi kualitas air dan memiliki konsentrasi sulfat, besi, dan logam terlarut yang tinggi [2, 3]. Penambangan bijih emas dengan tipe endapan *high sulphidation epithermal* (HSE) berpotensi menghasilkan AAT. Endapan HSE merupakan endapan yang terbentuk oleh sistem fluida hidrotermal yang berasal dari intrusi magmatik yang cukup dangkal dan didominasi oleh kandungan asam yang tinggi, bergerak secara vertikal dan horizontal melalui rekahan-rekahan pada batuan dengan suhu relatif tinggi [4, 5].

Material yang akan ditambang pada endapan HSE dibagi menjadi beberapa domain geologi yang dibedakan berdasarkan tipe alterasi, tingkat oksidasi, dan litologi batuan. Andini (2017) menyatakan pembentukan AAT dipengaruhi oleh tipe alterasi, terutama pada alterasi *silicic (host rock)* sangat dominan membentuk AAT. Kondisi ini disebabkan oleh kecenderungan nilai pH yang rendah dan sangat asam, teridentifikasi sudah terbentuk sebelumnya [6]. Kemudian, Jayaputra (2018) dalam penelitiannya menyatakan tipe alterasi tidak dapat menunjukkan keasaman dari hasil karakteristik geokimia antar sampel, namun dapat diketahui kecenderungan karakterisasi geokimia tiap alterasinya. Perbedaan ini disebabkan oleh keterdapatannya komposisi mineral dan unsur yang berbeda pada tiap sampel, sehingga dapat mempengaruhi laju oksidasi dan kereaktifan dari mineral sulfida dalam tipe alterasi yang sama [7]. Syaputra (2022), menyatakan domain geologi berdasarkan tingkat oksidasi paling berpengaruh dalam pembentukan asam pada endapan HSE ditinjau melalui analisis karakterisasi geokimia [8]. Menurut Syaputra (2022), laju reaksi geokimia pembentuk dan penetralan AAT, sangat dipengaruhi oleh perubahan mikrotekstur, susunan, dan asosiasi mineral yang terbentuk selama uji kinetik [8]. Oleh sebab itu, penelitian ini dikembangkan bertujuan untuk mengetahui proses pelapukan kimia dan asosiasi perubahan mineral yang terbentuk selama uji kinetik dalam mempengaruhi perubahan kualitas dari hasil air lindian menggunakan pemodelan geokimia simulasi PHREEQC berdasarkan tingkat oksidasi terpilih.

Pemodelan geokimia hasil air lindian menggunakan perangkat lunak PHREEQC untuk mengetahui mineral-

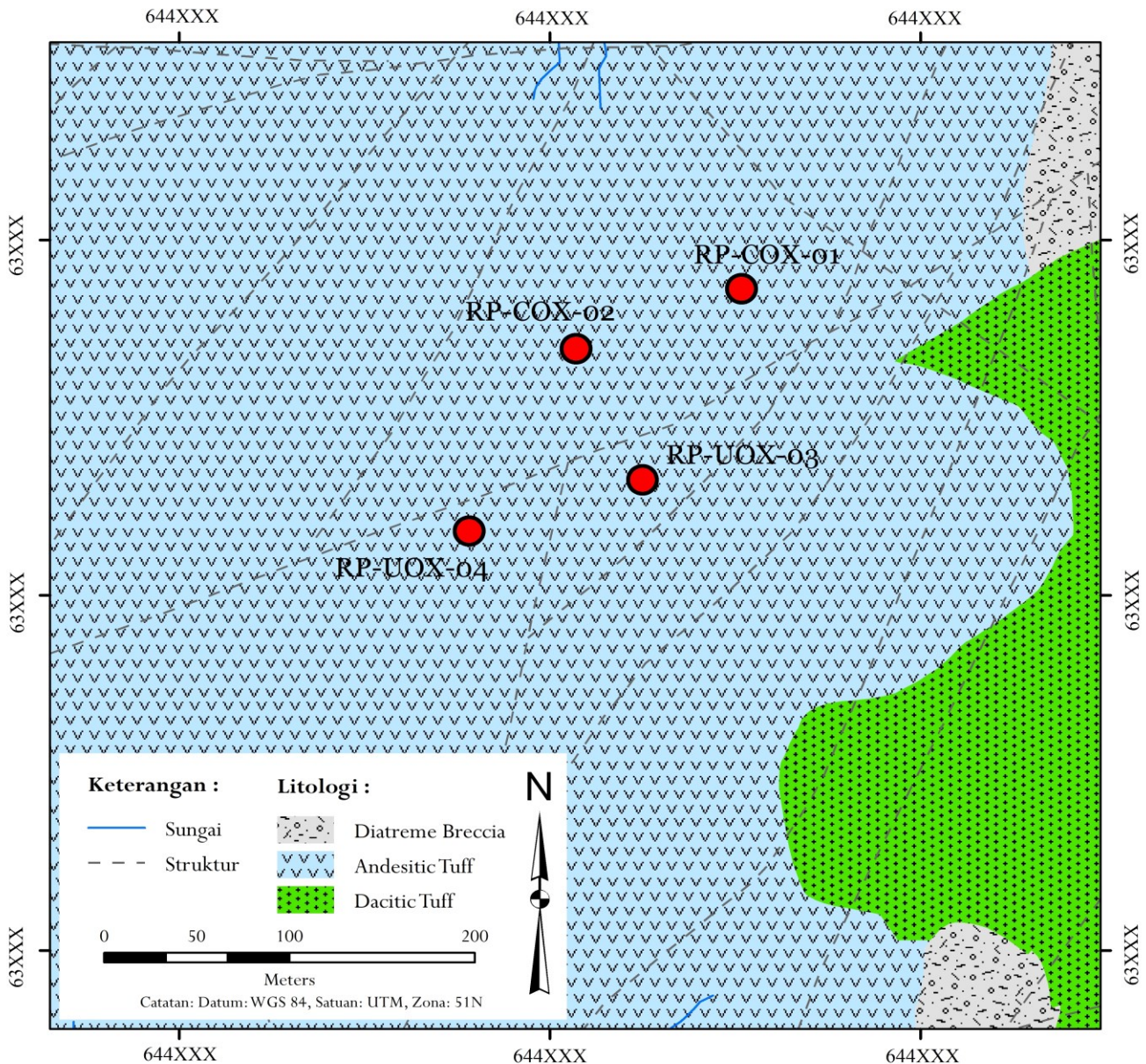
mineral dan transfer mol yang berperan terhadap pembentukan AAT. PHREEQC memiliki kemampuan yang andal dalam perhitungan geokimia hasil air lindian hingga temperatur rendah [9]. Selain itu nilai transfer mol berguna untuk memprediksi potensi suatu mineral atau senyawa hasil air lindian untuk mengendap dan melarut. Transfer mol dari mineral hasil air lindian perlu dilakukan untuk mengetahui estimasi proses atau reaksi yang terjadi selama uji kinetik berlangsung secara *inverse* dan *forward modeling*. Serta meninjau laju oksidasi mineral sulfida berdasarkan pendekatan mol besi total, mol sulfat, dan mol pirit hasil pemodelan geokimia PHREEQC. Tujuan dari pemodelan geokimia menggunakan PHREEQC ini adalah untuk mengetahui mineral-mineral apa saja yang mungkin muncul di permukaan sebagai presipitat, maupun mineral yang mungkin larut di dalam air lindian. Serta mengidentifikasi komposisi geokimia batuan, mineral ubahan, dan mineral sekunder akibat interaksi antara fluida dan batuan di daerah hidrotermal yang sudah terbentuk pada kondisi lapangan.

METODE PENELITIAN

MATERIAL

Material dalam penelitian ini merupakan sampel batuan yang berasal dari tambang emas bertipe HSE di lokasi X (Gambar 1) yang berada di Provinsi Sulawesi Utara, Indonesia. Sampel diambil pada tahun 2020 menggunakan metode *hand specimen* yang berasal dari singkapan tuf andesitik (*andesitic tuff*) yang merupakan tuf dengan komposisi geokimia berasal dari batuan andesitik [8]. Selain itu, sampel dapat dibedakan berdasarkan domain geologi (tipe alterasi, litologi, dan tingkat oksidasi).

Tingkat oksidasi yang berkembang di lokasi sampel penelitian berdasarkan terhadap variasi dan intensitas oksidasinya yang meliputi *completely oxidized* (COX) merupakan zona teroksidasi sempurna dan zona pelindian paling atas, yang dicirikan dengan kandungan mineral sulfida sepenuhnya berubah menjadi *fe-oxide* berupa mineral *jarosite* dan *hematite*. *Moderately oxidized* (MOX) merupakan zona pelindian transisi antara lapisan COX dan UOX, yang dicirikan dengan keberadaan *pyrite* yang mulai terdapat indikasi perubahan menjadi *fe-oxide* berupa *jarosite* dan *hematite*. Serta *un-oxidized* (UOX) merupakan kondisi yang tidak memperlihatkan indikasi konsumsi mineral sulfida yang terjadi atau disebut juga sebagai zona primer, didominasi oleh mineral *pyrite* [10]. Material yang digunakan pada penelitian ini sebanyak 4 (empat) sampel yang dilakukan analisis geokimia menggunakan pengujian mineralogi, statik, kinetik, dan pemodelan geokimia.



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian

MINERALOGI DAN GEOKIMIA

Uji mineralogi dilakukan untuk mengetahui komposisi, persebaran mineral dan unsur yang terkandung di dalam sampel batuan, sementara uji geokimia dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana mineral pembentuk asam dapat bereaksi [8]. Karakterisasi mineralogi memerlukan beberapa uji, meliputi XRD untuk mengetahui komposisi mineral (*Smartlab*). Karakterisasi geokimia didukung oleh uji statik dan kinetik. Uji statik bertujuan untuk mengetahui potensi pembentuk air asam yang akan terjadi pada batuan, tanpa mempertimbangkan laju reaksi pembentukan dan penetralan asam. Uji statik meliputi pH pasta, *net acid generation* (NAG pH), dan *acid base*

accounting (ABA). Uji statik adalah langkah awal mengkarakterisasi batuan *single measurement in time* dan tidak membutuhkan waktu lama [11].

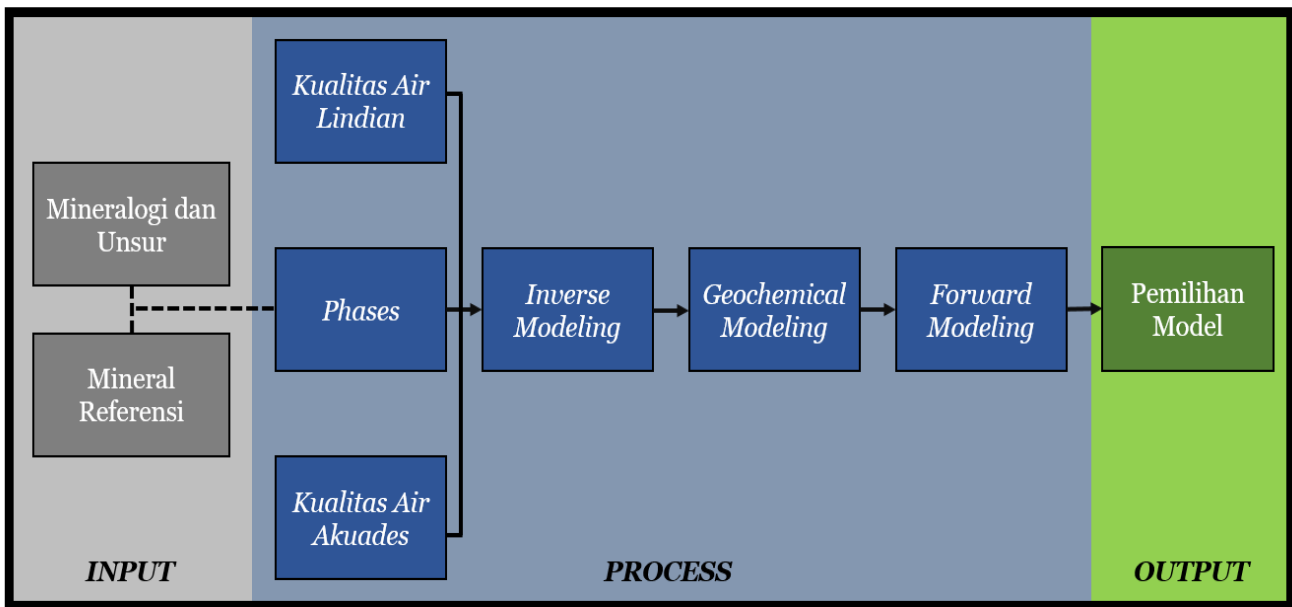
Uji kinetik bertujuan untuk menentukan laju relatif pelapukan mineral sulfida dari reaksi oksidasi dan analisis penetral oleh mineral alkali serta kelarutan logam pada AAT. Penelitian dilakukan menggunakan *free draining column leach test* (FDCLT) yang dirancang berdasarkan siklus basah dan kering yang diatur menggunakan siklus penyiraman harian, 3 harian, dan mingguan. Lama pengujian dilakukan selama 160 hari [11]. Hasil air lindi ditampung pada wadah dan kemudian diukur kualitas air berdasarkan parameter pH

dan konsentrasi logam terlarut menggunakan *inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS) dan *ion chromatography* (IC) pada hari ke-8 dan hari ke-68 yang mewakili proses oksidasi mineral sulfida.

PEMODELAN GEOKIMIA

Pemodelan geokimia menggunakan perangkat lunak PHREEQC dilakukan untuk mensimulasikan berbagai reaksi kesetimbangan di dalam air lindian, pertukaran ion, dan lain sebagainya [9]. PHREEQC memiliki program untuk memodelkan disolusi dan pengendapan *non equilibrium* mineral. Mineral-mineral yang mungkin bereaksi harus ditentukan terlebih dahulu, selain itu perlu menambahkan reaksi-reaksi yang mungkin terjadi dan ditambahkan dalam *default database*. Pada bagian input ini mineral presipitat dengan hasil mineralogi (XRD) perlu dibandingkan untuk mengkonfirmasi pemodelan PHREEQC.

Pada bagian *process* dimulai dengan mereaksikan air destilat sebagai *initial solution* dengan mineral yang terdeteksi pada mineralogi dan unsur, serta hasil kualitas air lindian sebagai *final solution*. *Inverse modeling* dapat menghitung perubahan kimia yang mungkin terjadi selama pengujian kinetik, dengan asumsi terdapat dua karakteristik larutan yang merepresentasikan kondisi awal dan akhir. Mol transfer terjadi disebabkan oleh larutan awal yang bereaksi dengan *input*. Pemilihan model yang paling tepat diverifikasi menggunakan *forward modeling*. Metode ini menghasilkan banyak sekali model reaksi yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, verifikasi dilakukan dengan mereaksikan air destilat dengan fasa yang bereaksi dan menghasilkan kualitas air simulasi dan model yang mendekati pH air lindian hasil uji kinetik. Proses pemodelan geokimia ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi pemodelan geokimia menggunakan PHREEQC

HASIL DAN PEMBAHASAN

MINERALOGI ENDAPAN HSE

Kandungan mineralogi pada endapan HSE berdasarkan hasil pengujian XRD, didominasi oleh mineral *silicate* berupa *quartz* yang keberadaannya melimpah di alam, selain itu dijumpai mineral primer berupa *muscovite* dan dirangkum pada Tabel 1. Kandungan mineral sulfida didominasi oleh *pyrite* sebagai mineral utama dalam pembentuk AAT. Jika suatu batuan memiliki kandungan sulfida yang tinggi, dengan persentase *pyrite* hampir mendekati 100% terdapat pada sampel UOX, maka akan menghasilkan lindian yang lebih asam dan memiliki laju

reaksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan sulfida yang rendah (COX) [8]. Fase oksidasi yang dicirikan dengan mineral *hematite*, diperkirakan sudah terbentuk pada kondisi lapangan, sehingga oksidasi *pyrite* menjadi *hematite* terjadi pada sampel COX, selain itu dijumpai juga *alunite*, yang merupakan mineral sulfat *non generate acid*, yang berfungsi sebagai *buffer* untuk oksidasi mineral *pyrite* dalam batuan [12]. Proses oksidasi *pyrite* terjadi sebagai akibat masuknya oksigen dan air secara bersamaan kebatuan melalui celah-celah atau rekahan kecil akibat dari pelapukan batuan, sehingga membentuk *hematite* dan asam sulfat diakhir reaksi [8].

Tabel 1. Hasil mineralogi pada endapan HSE menggunakan uji XRD

Kode Sampel	Mineralogi	Rumus Kimia
RP-COX-01	Quartz	SiO ₂
	Alunite	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
	Hematite	Fe ₂ O ₃
	Goethite	Fe ³⁺ O(OH)
RP-COX-02	Quartz	SiO ₂
	Alunite	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
	Hematite	Fe ₂ O ₃
	Goethite	Fe ³⁺ O(OH)
	Jarosite	KFe ₃ ⁺ (OH) ₆ (SO ₄) ₂
RP-UOX-03	Quartz	SiO ₂
	Pyrite	FeS ₂
	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Muscovite	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂
RP-UOX-04	Quartz	SiO ₂
	Pyrite	FeS ₂
	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Muscovite	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂

Selain itu pada saat pH turun sampai pada kondisi yang seimbang, menyebabkan mineral hidroksida sekunder larut dan membentuk *gibbsite* atau aluminium hidroksida amorf di dalam AAT [8]. Mineral ini terbentuk akibat dari pelarutan mineral aluminosilikat berupa *muscovite* yang terjadi selama fase kinetik.

GEOKIMIA ENDAPAN HSE

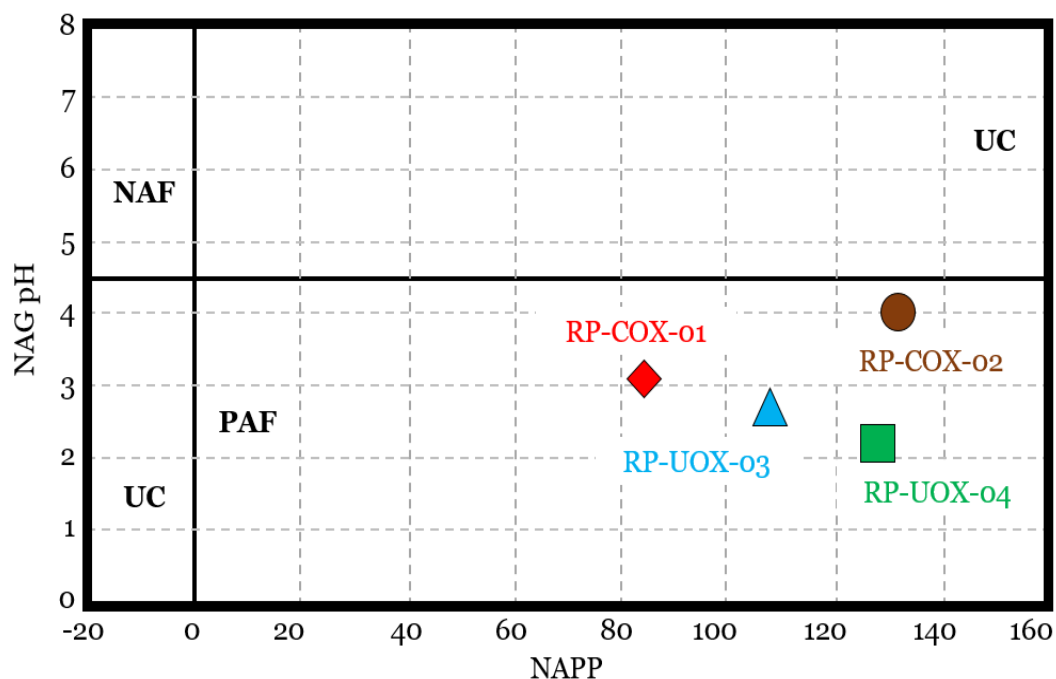
Klasifikasi geokimia endapan HSE yang dilakukan untuk mengetahui potensi pembentukan asam yang

dihasilkan melalui uji statik dan ditampilkan pada Tabel 2. Nilai total sulfur untuk sampel COX berkisar antara 2,76 hingga 4,26 % dan sampel UOX berkisar antara 3,52 hingga 4,12 %. Kandungan sulfur pada sampel COX tidak sepenuhnya berasal dari mineral sulfida, melainkan berasal dari sulfat dalam bentuk *jarosite* dan *alunite*. Potensi keasaman maksimum (MPA) untuk sampel COX berkisar antara 84,53 hingga 130,46 kg H₂SO₄/ton batuan dan sampel UOX berkisar antara 107,80 hingga 126,18 kg H₂SO₄/ton batuan.

Tabel 2. Hasil geokimia pada endapan HSE menggunakan uji statik

Kode Sampel	TS (%)	MPA	ANC	NAPP	NAG pH
RP-COX-01	2,76	84,53	<0,5	84,53	3,10
RP-COX-02	4,26	130,46	<0,5	130,46	4,06
RP-UOX-03	3,52	107,80	<0,5	107,80	2,62
RP-UOX-04	4,12	126,18	<0,5	126,18	2,23

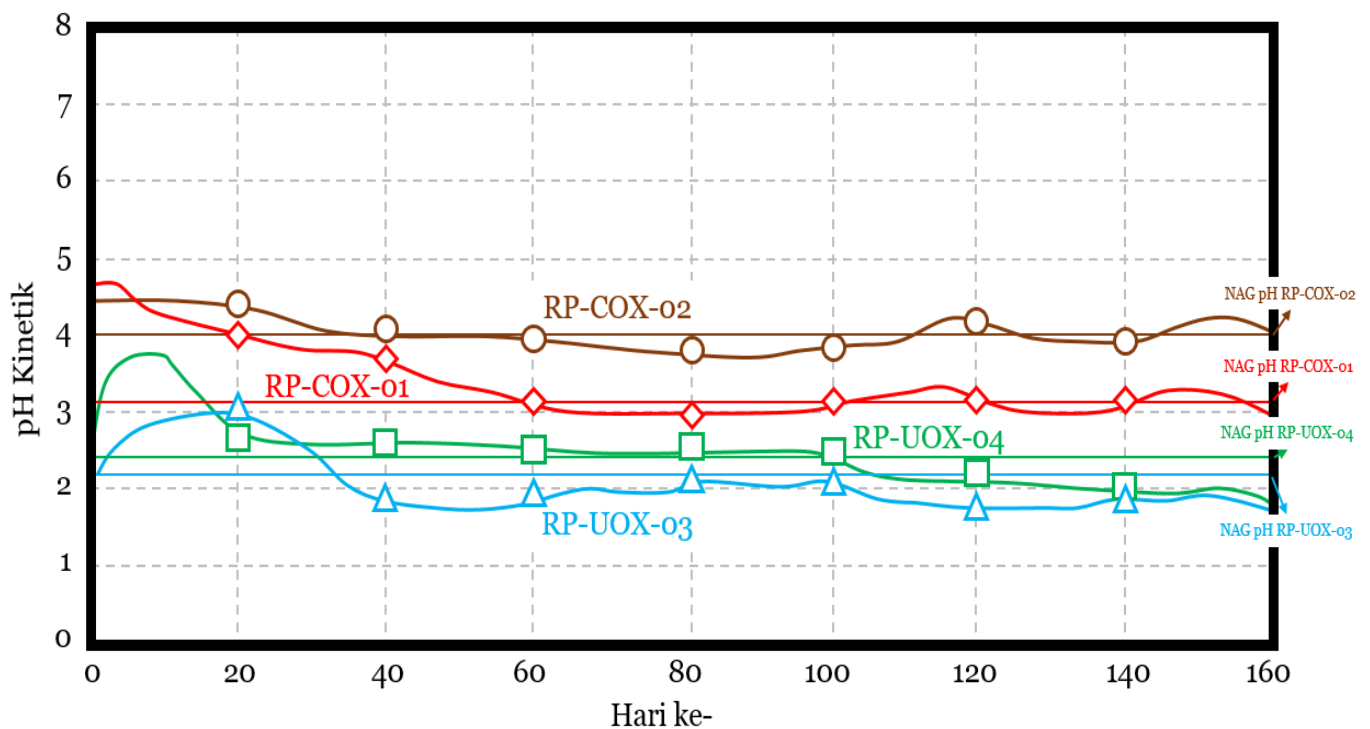
Sampel endapan HSE dikategorikan sebagai *potentially acid forming* (PAF). Sampel dengan kategori ini memiliki nilai NAG pH kurang dari 4,5 dan NAPP bernilai positif yang ditunjukkan pada Gambar 3. Sampel COX berkisar antara 3,10 hingga 4,06 dan sampel UOX berkisar antara 2,23 hingga 2,62. Potensi produksi asam bersih (NAPP) untuk sampel COX berkisar antara 84,53 hingga 130,46 kg H₂SO₄/ton batuan dan sampel UOX berkisar antara 107,80 hingga 126,18 kg H₂SO₄/ton batuan.



Gambar 3. Hasil klasifikasi geokimia pada endapan HSE [11]

Untuk memastikan pengujian statik yang dilakukan, penelitian ini dilengkapi oleh pengujian kinetik skala laboratorium yang dilakukan selama 160 hari yang ditinjau berdasarkan perubahan pH-nya dan ditampilkan pada Gambar 4. Uji kinetik sangat berguna dalam memprediksi karakteristik pelapukan yang terjadi dalam jangka panjang. Sampel COX memiliki rata-rata pH kinetik dibawah 4,5 dan sampel UOX memiliki rata-rata pH kinetik dibawah 3,5. Pada sampel UOX didominasi oleh *pyrite* yang memiliki reaktiv pada saat teroksidasi

pada kolom uji. Sementara sampel COX didominasi oleh mineral oksida berupa *hematite*. Selain itu, sampel UOX memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan COX untuk membentuk asam atau mencapai keasaman yang *state*. Hal ini disebabkan pada waktu kurang dari 10 (sepuluh) hari sampel UOX masih *flushing*. Sementara, sampel COX masih terdapat sisa-sisa oksidasi sebelumnya yang diindikasikan sebagai hasil dari lapangan yang menyebabkannya sudah mencapai kondisi yang asam.



Gambar 4. Hasil pengujian kinetik endapan HSE selama 160 hari

Berdasarkan uji kinetik didapatkanlah informasi durasi reaksi oksidasi yang terjadi selama uji kinetik skala laboratorium. Sehingga laju oksidasi ini dapat membantu dalam mengendalikan penanganan AAT.

PEMODELAN GEOKIMIA ENDAPAN HSE

Simulasi prediksi geokimia hasil air lindian pada endapan HSE menggunakan PHREEQC dilakukan berdasarkan dua macam pemodelan, yaitu *inverse* dan *forward modeling*. Model geokimia *inverse* merupakan langkah awal untuk memberikan gambaran mineral yang bereaksi dan berperan dalam membentuk asam, sementara *forward* berfungsi memverifikasi model geokimia. Adapun hal-hal yang merupakan *input* dalam program PHREEQC untuk melakukan *inverse modeling* adalah *input solution* awal yang merupakan air *aquadest* yang memiliki pH netral dan tidak mengandung logam berat, *input solution* akhir, *input mineral*, *uncertainties*,

dan *balances*. *Uncertainty* merupakan komponen yang menyatakan seberapa persen tingkat kepercayaan user terhadap hasil *simulasi inverse modeling* tersebut. Komponen unsur dalam *solution* yang tidak terdeteksi pada mineral *phase* dapat ditambahkan ke dalam *input balance*.

Adapun unsur yang menjadi *input balance* dalam penelitian ini adalah Ca, Cl, Mg, N(-3), N(5), Na, Cu, Mn(2), K. *Database* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *database llnl.dat* yang disusun oleh *Lovermore National Laboratory*. Mineral *input* program PHREEQC pada Tabel 1 tidak hanya berasal dari mineral hasil uji XRD, akan tetapi ditambah juga dengan mineral yang diperoleh dari hasil referensi.

Penurunan pH yang terjadi selama uji kinetik ditinjau menggunakan pemodelan geokimia yang ditampilkan pada Tabel 3. Nilai penurunan pH laboratorium antar

sampel tidak terlalu besar dibandingkan dengan simulasi sehingga didapat *error* dibawah 5%.

Tabel 3. Perbandingan nilai pH laboratorium dan hasil simulasi

Kode Sampel	pH lab.		pH sim.		Error (%)	
	8	68	8	68	8	68
	RP-COX-01	4,09	3,04	4,13	3,19	1
RP-COX-02	4,31	3,86	4,21	3,95	2	2
RP-UOX-03	3,58	2,48	3,56	2,48	0	0
RP-UOX-04	2,78	2,06	2,84	2,05	2	1

Selain penilaian terhadap pH, sulfat yang dihasilkan selama kinetik perlu untuk ditinjau dan ditampilkan pada Tabel 4. Peningkatan sulfat yang terjadi selama uji kinetik ditinjau menggunakan pemodelan geokimia yang ditampilkan pada Tabel 4. Nilai peningkatan sulfat pada laboratorium tidak terlalu besar dibandingkan dengan simulasi sehingga didapat *error* di bawah 10%.

Tabel 4. Perbandingan nilai sulfat laboratorium dan hasil simulasi

Kode Sampel	SO ₄ lab.		SO ₄ sim.		Error (%)	
	8	68	8	68	8	68
	RP-COX-01	6,60	33,2	6,56	33,2	6
RP-COX-02	9,99	15,1	9,14	15,1	8	0
RP-UOX-03	43,0	696	43,0	685	0	2
RP-UOX-04	289	1516	286	1513	1	0

Hasil dari pemodelan *inverse modeling* menggunakan program PHREEQC menghasilkan beberapa model pembentukan AAT atau hasil air lindian uji kinetik. Model-model pembentukan AAT ini terdiri dari sekumpulan mineral yang mungkin bereaksi beserta nilai transfer molnya. Jika pH hasil simulasi memiliki nilai yang sama dengan pH hasil kualitas air lindian hasil uji kinetik laboratorium maka model tersebut dapat digunakan sebagai model representatif yang dapat menggambarkan proses pembentukan AAT.

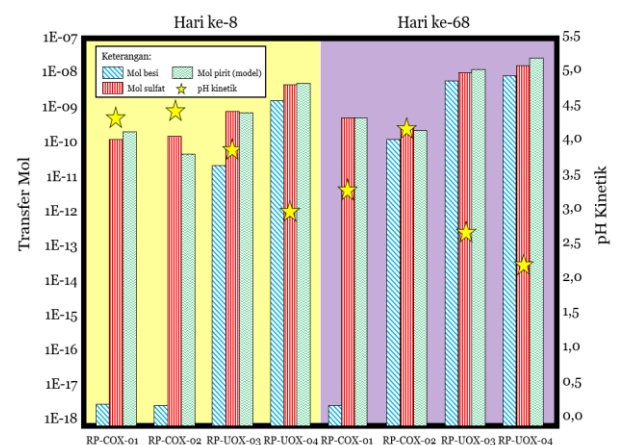
Hasil *inverse modeling*, diperoleh model fase transfer mol yang mungkin terjadi dari reaksi antar *solution* dan mineral. Nilai dari fase transfer mol yang terjadi menunjukkan adanya mekanisme fase yang terlibat. Reaksi yang menyebabkan mineral larut ditandai dengan transfer mol positif dan reaksi mineral mengendap ditandai dengan transfer mol negatif. Model terpilih (akhir) ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Model terpilih hasil simulasi *inverse modelling* menggunakan PHREEQC

Hari ke-8		Hari ke-68	
Mineral	Transfer mol	Mineral	Transfer mol
RP-COX-01			
<i>Pyrite</i>	5.79E-05	<i>Pyrite</i>	1.73E-04
<i>Hematite</i>	-2.89E-05	<i>Hematite</i>	-8.65E-05
<i>O₂(g)</i>	1.55E-04	<i>O₂(g)</i>	1.00E-03
RP-COX-02			
<i>Pyrite</i>	3.83E-05	<i>Pyrite</i>	6.76E-05
<i>Hematite</i>	-1.91E-05	<i>Hematite</i>	-1.71E-05
<i>Alunite</i>	1.32E-05	<i>Jarosite</i>	1.08E-05
<i>Gibbsite</i>	-4.74E-06	<i>Alunite</i>	-1.23E+01
<i>O₂(g)</i>	1.03E-04	<i>O₂(g)</i>	2.30E-04
RP-COX-03			
<i>Pyrite</i>	0.000224	<i>Pyrite</i>	3.65E-03
<i>Aragonite</i>	0.000280	<i>Quartz</i>	-8.18E-04
<i>Muscovite</i>	2.34E-06	<i>Muscovite</i>	2.19E-04
<i>O₂(g)</i>	0.000845	<i>Alunite</i>	-2.08E-05
		<i>Anorthite</i>	7.97E-05
		<i>O₂(g)</i>	1.30E-02
RP-COX-04			
<i>Pyrite</i>	1.51E-03	<i>Pyrite</i>	7.91E-03
<i>Muscovite</i>	1.29E-04	<i>Quartz</i>	-1.81E-04
<i>Ferrihydrite</i>	-3.53E-04	<i>Muscovite</i>	6.03E-05
<i>O₂(g)</i>	5.17E-03	<i>O₂(g)</i>	2.76E-02

LAJU OKSIDASI ENDAPAN HSE

Laju oksidasi adalah perubahan mol per satuan waktu per satuan luas permukaan sampel pada kolom, luas permukaan sampel dalam kolom adalah 1,2m². Terdapat tiga pendekatan yang digunakan pada penelitian ini untuk menghitung laju oksidasi yaitu berdasarkan mol besi total, mol sulfat dan mol pirit (hasil PHREEQC).



Gambar 5. Laju oksidasi berdasarkan mol besi total, mol sulfat dan mol pirit

Terlihat pada Gambar 5 laju reaksi *pyrite* pada sampel COX lebih rendah dibandingkan sampel UOX. Hal tersebut dapat disebabkan reaksi oksidasi *pyrite* pada

sampel COX lebih sedikit dibandingkan sampel UOX. Mengingat pada sampel COX telah terjadi proses oksidasi yang sudah terbentuk sebelumnya pada kondisi lapangan yang ditandai dengan kehadiran mineral oksida (*hematite*), sedangkan sampel UOX memiliki mineral sulfida dalam masih *fresh* (belum terganggu) sehingga masih banyak dijumpai mineral primer selain mineral sulfida.

KESIMPULAN

Karakterisasi geokimia potensi pembentukan AAT pada tingkat oksidasi COX dan UOX tergolong sebagai *potential acid forming* (PAF). Pengelompokan oksidasi didasarkan oleh keterdapatannya *hematite* (Fe_2O_3) pada sampel COX, yang diindikasikan sudah terbentuk pada kondisi lapangan. Sementara, sampel UOX terdapat *pyrite* yang masih belum terganggu (*fresh*). Transfer mol yang paling dominan pada sampel COX adalah transfer mol dari sisa reaksi oksidasi *pyrite* yang masih tersedia didalam sistem ($3,646 \times 10^{-5} - 1,309 \times 10^{-4}$ mol). Sama halnya dengan sampel UOX transfer mol yang paling dominan adalah reaksi oksidasi *pyrite* dalam keadaan belum terganggu ($4,66 \times 10^{-4} - 5,53 \times 10^{-3}$ mol). Sehingga reaksi oksidasi UOX jauh lebih besar, jika dibandingkan COX. Laju oksidasi yang terjadi pada endapan HSE yang paling mendekati adalah mol sulfat sebesar ($1,172 \times 10^{-10}$ mol/m²s – $5,453 \times 10^{-10}$ mol/m²s) lebih mendekati nilai laju oksidasi *pyrite* hasil pemodelan geokimia PHREEQC sebesar ($4,25 \times 10^{-11}$ mol/m²s – $5,561 \times 10^{-10}$ mol/m²s). Laju Reaksi *pyrite* pada sampel COX lebih rendah, jika dibandingkan sampel UOX disebabkan pada sampel COX lebih sedikit mengalami reaksi oksidasi dibandingkan sampel UOX. Kondisi ini juga diperkuat dari hasil mineralogi, bahwa sampel COX didominasi oleh mineral oksida (*hematite*), sementara UOX didominasi oleh mineral sulfida (*pyrite*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gautama, RS. (2014). Pembentukan, Pengendalian, dan Pengelolaan Air Asam Tambang, Penerbit ITB.
- [2] Amos, RT., Blowes, DW., Bailey, BL., Sego, DC., Smith, L., Ritchie, AIM. (2015). Waste-rock Hydrogeology and Geochemistry. *Appl Geochem* 57:140-156.
- [3] Vriens, B., Peterson, H., Laurenzi, L., Smith, L., Aranda, C., Mayer KU. Beckie, RD. (2019). Long-term Monitoring of Waste-Rock Weathering at the Antamina Mine, Peru. *Chemosphere* 215:858-869.2019.
- [4] Simmons, SF., White, NC., John, DA. (2005). Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume, 485-522.
- [5] Hedenquist, JW., Arribas, A. (2021). Exploration Implications of Multiple Formation Environments of Advanced Argillic Minerals. *Economic Geology*.
- [6] Andini, DE. (2017). Prediksi Kualitas Air Tambang Cebakan Emas Epithermal High Sulfidation. *Tesis Magister Rekayasa Pertambangan. ITB. Bandung.*
- [7] Jayaputra, HA. (2018). Kajian Karakteristik Batuan dalam Pembentukan Air Asam Tambang pada Endapan Epithermal High Sulphidation. *Tesis Magister Rekayasa Pertambangan. ITB. Bandung.*
- [8] Syaputra, R. (2022). Identifikasi Pelapukan Batuan dalam Evolusi Pembentukan Air Asam Tambang pada Uji Kinetik Skala Laboratorium menggunakan Pendekatan Geokimia-Mineralogi-Tekstur: Studi Kasus Endapan High Sulphidation Epithermal. *Tesis Magister Rekayasa Pertambangan. ITB. Bandung.*
- [9] Parkhurst, LD., Appelo. (2013). Description of Input and Examples for PHREEQC version 3 a Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. *USGS. Chapter 43. Colorado.*
- [10] Yibas, B. (2021). Oxidation Process and Formation of Acid Mine Drainage from Gold Mine Tailings: A South African Perspective.
- [11] AMIRA. (2012). AMIRA P387A Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage. *ARD Test Handbook.*
- [12] Siregar, LH., Nasution, Z., Fatimah. (2021). Pengelolaan Air Asam Tambang dari Batuan Sisa di Pit Barani dan Ramba Joring serta Aplikasi Model Enkapsulasi pada Bendungan Tailing di Tambang Emas Martabe. *Serambi Engineering.*