



**ANALISIS PENYISIHAN KEKERUHAN DAN FAKTOR GEOKIMIA DARI
PENCAMPURAN AIR TAMBANG KEKERUHAN TINGGI
DENGAN AIR ASAM TAMBANG**

***ANALYSIS OF TURBIDITY REMOVAL AND GEOCHEMICAL FACTOR FROM
MIXING THE HIGH TURBIDITY OF MINE WATER
AND ACID MINE DRAINAGE***

D.C. Dyestiana¹, A. Badhurahman², G.J. Kusuma³

¹Magister Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

²⁻³Departemen 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: ¹diandyestiana@gmail.com, ²abiebadhurahman@gmail.com, ³jaluku@mining.itb.ac.id

ABSTRAK

Kegiatan pertambangan yang mengubah bukaan lahan berdampak terhadap perubahan kualitas air permukaan. Isu lingkungan seperti air asam tambang (AAT) dan air tambang kekeruhan tinggi dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan sehingga diperlukan pengelolaan. Di sisi lain, AAT memiliki potensi koagulan, tetapi kinerjanya berbeda-beda tergantung karakteristik air dari masing-masing *site*, sehingga karakterisasi awal kualitas air menjadi penting. Pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan AAT dalam rasio pencampuran yang optimum dapat menurunkan kekeruhan dan meningkatkan pH air campuran. Tujuan penelitian ini adalah memahami rasio optimum pencampuran dan parameter geokimia yang mempengaruhi reaksi penyisihan kekeruhan dari fenomena pencampuran tersebut. Penentuan rasio optimum ditinjau dari tingkat penyisihan kekeruhan dan logam terlarut dalam rentang pH yang memenuhi baku mutu. Sampel air tambang kekeruhan tinggi diambil dari inlet WMP 41 dengan kode nama TK sedangkan air asam tambang diambil dari Pit C1E dengan kode nama AAT, di sebuah tambang batubara di Kalimantan Timur. Metode simulasi pencampuran adalah *jar test* untuk diukur kekeruhan, pH, dan logam terlarut. Karakteristik kimia air dan geokimia endapan hasil pencampuran akan dianalisis melalui simulasi pemodelan dengan *software* PHREEQC. Karakteristik AAT termasuk tipe air kalsium sulfat sedangkan air TK merupakan tipe air natrium bikarbonat. Rasio optimum pencampuran air TK:AAT berdasarkan kriteria penyisihan kekeruhan dan logam terlarut dalam rentang pH yang memenuhi baku mutu adalah 1:1. Kecenderungan pengendapan ditinjau dari nilai indeks saturasi menunjukkan adanya pembentukan Aluminium hidroksida $Al(OH)_3$; Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$); dan Besi hidroksida $(FeOH)_3$. Faktor geokimia yang berperan dalam reaksi pengendapan adalah keberadaan kation valensi tinggi serta konsentrasi alkalinitas dan sulfat.

Kata kunci: indeks saturasi, *jar test*, PHREEQC, supernatan, turbiditas

ABSTRACT

Mining activities change the landscapes which affect surface water quality. Environmental issues such as acid mine drainage (AMD) and high turbidity mine drainage yield a negative impact towards the environment, hence the mine drainage management is essential. On the other hand, AMD has a coagulant potential, yet the performance is pertinent to the water quality characteristic: it is imperative for initial characterization of AMD. The mixing of high turbidity mine drainage and AMD in the optimum mixing ratio could remove turbidity and enhance the pH level. Therefore, this study aims to determine the optimum ratio and explain the geochemical factor that influences the turbidity removal. The optimum ratio is determined by observing turbidity, the compliance of pH value and dissolved metal concentration. In this study, high turbidity mine drainage is collected from inlet of WMP 41, namely TK whereas the acid mine water is gathered from Pit C1E namely AAT, in a coal mining, East Kalimantan. Turbidity, pH, and dissolved metal from jar test mixture would be analyzed. In comparison, the mixing would be modelled using PHREEQC software. The initial characteristic of AAT is type of calcium sulphate whereas TK sample is sodium bicarbonate. The optimum mixing ratio of TK:AAT is 1:1. The tendency of precipitation of minerals (e.g. Aluminum hydroxide $Al(OH)_3$); Gypsum $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$; and Iron hydroxide $(FeOH)_3$) are



analyzed by the saturation indices (SI). The geochemical factors that contribute to the sedimentation process are the occurrence of high valence cations; and the concentration of alkalinity and sulphate.

Keywords: saturation indices, jar test, PHREEQC, supernatant, turbidity.

PENDAHULUAN

Seiring dengan kemajuan bukaan lahan pada kegiatan pertambangan batubara dapat menyebabkan tingginya turbiditas (kekeruhan) pada air larian (*surface runoff*) akibat erosi saat hujan [1] serta interaksi air larian dengan oksidasi mineral sulfida yang terdedah turut berperan dalam pembentukan air asam tambang (AAT) [2]. Kedua karakteristik air tambang tersebut dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan dan manusia. Bak mata uang yang memiliki dua sisi, karakteristik AAT dari kegiatan pertambangan batubara umumnya mengandung besi (Fe), aluminium (Al), dan mangan (Mn) sebagai basis logam terlarut utama juga memiliki potensi pengkoagulasi sebagaimana kandungan utama koagulan yang berbasis Fe dan Al [3,4].

Dalam penelitian Qurniawan (2020) menyatakan bahwa pemanfaatan AAT dalam rasio pencampuran yang optimum dapat menurunkan TSS dalam rentang baku mutu kualitas air sesuai regulasi yang berlaku. Uji coba penggunaan AAT sintesis lebih efektif dalam penyisihan TSS dibandingkan dengan koagulan komersil menurut Septiariva (2014) dan reaksi tersebut turut dipengaruhi kondisi pH optimum berdasarkan Yuri dkk (2012). Kekekruhan memiliki korelasi positif dengan TSS yang disebabkan terutama oleh partikel koloid lempung [5,6,7]. Pada alternatif pengolahan koagulasi lainnya menurut penelitian Wei dkk (2021) menyatakan efektivitas penyisihan kekeruhan lebih optimum pada pembubuhan dosis Al dibandingkan kalsium (Ca). Oleh karena itu, studi penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perubahan parameter kekeruhan dan karakteristik kimia air kaitannya pada optimasi pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan AAT yang diambil langsung dari lokasi kegiatan pertambangan atau bukan bersifat sintesis.

Hipotesis dari studi penelitian ini adalah pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan AAT dalam rasio optimum dapat menyisihkan kekeruhan dan logam terlarut dalam rentang pH yang memenuhi baku mutu melalui mekanisme penyisihan yang berhubungan dengan reaksi geokimia Al dan Fe. Penyisihan TSS dan kekeruhan melalui proses koagulasi-flokulasi yang ditandai dengan pembentukan endapan hidroksida bersifat tak larut, seperti $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [8,9]. Dalam Perda Provinsi Kalimantan Timur No. 2 Tahun 2011 yang mengatur baku mutu efluen kegiatan pertambangan batubara, ambang batas konsentrasi parameter Fe, Mn, TSS, dan pH diatur. Evolusi geokimia pada perubahan karakteristik fasies/tipe air umumnya

dapat diinterpretasikan melalui Diagram Piper [10]. Selain itu, mekanisme reaksi geokimia yang terjadi dapat dijelaskan dari simulasi pencampuran menggunakan perangkat lunak PHREEQC. PHREEQC merupakan akronim pH-Redoks-Ekuilibrium melalui bahasa C. Fungsi instruksi PHREEQC yang digunakan adalah *solution* (termasuk di dalamnya perhitungan spesiasi geokimia) untuk mendefinisikan karakteristik awal larutan dan *mixing* untuk mencampurkan dua atau lebih larutan. Hasil pengolahan data simulasi pencampuran tersebut dapat berupa diagram spesiasi kation/anion dan indeks saturasi senyawa sehingga dapat menunjukkan reaksi geokimia pengendapan yang mungkin terjadi. Analisis proses reaksi dalam fenomena pencampuran yang terjadi dapat bermanfaat bagi pengembangan keilmuan terhadap pemanfaatan AAT dalam alternatif pengelolaan air tambang di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Pengambilan Sampel dan Simulasi Pencampuran

Simulasi pencampuran dilakukan skala laboratorium, yaitu Laboratorium Lingkungan Tambang, Institut Teknologi Bandung dengan 2 sampel air yang berasal dari salah satu wilayah pertambangan batubara di Kalimantan Timur. Sampel air tambang kekeruhan tinggi (*high turbidity mine water*) diambil dari inlet kolam pengendapan *Water Monitoring Point* 41 (WMP 41) dengan nama kode sampel yaitu TK sedangkan sampel air asam tambang yang diambil dari Pit C1E dinamakan dengan kode sampel AAT. Pengambilan sampel masing-masing sebanyak 25 liter sesaat setelah hujan untuk dilakukan karakterisasi awal dan simulasi pencampuran dengan metode *Jar Test* sesuai SNI 19-6449-2000.

Waktu penelitian ini berlangsung selama 3 bulan, dengan uraian kegiatan diawali dengan pengambilan sampel di lapangan dan karakterisasi awal sampel air TK dan AAT pada 1 bulan pertama. Kemudian, simulasi pencampuran *Jar Test* dilakukan di laboratorium pada bulan kedua seperti yang tertera dalam Gambar 1. Tahap ketiga diakhiri dengan analisis simulasi pencampuran dengan perangkat lunak PHREEQC pada bulan selanjutnya.



(a)



(b)

Gambar 1. Simulasi *Jar Test* (a) pengadukan cepat 1 menit (120 rpm); (b) pengadukan lambat 25 menit (40 rpm)

Simulasi pencampuran melalui metode *Jar Test* dilakukan dalam total volume 1 liter Duran *breaker glass* dengan desain pembagian rasio pencampuran TK:AAT, meliputi 4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, dan 1:4. Kemudian pH, kekeruhan, dan logam terlarut pada supernatan hasil pencampuran diukur secara aktual untuk dianalisis tingkat penyisihannya. Adapun prinsip perhitungan tingkat penyisihan (*total removal efficiency, TRE*) adalah perhitungan selisih antara konsentrasi awal (T_0) dengan konsentrasi akhir hasil pencampuran (T) dibandingkan dengan konsentrasi awal (T_0).

$$TRE (\%) = \frac{(T_0 - T)}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

Simulasi pencampuran untuk mengetahui karakteristik kimia air hasil pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan AAT dilakukan menggunakan perangkat lunak PHREEQC. Fungsi instruksi PHREEQC yang digunakan adalah *Solution* dan *Mix*. Analisis karakteristik awal yang dilakukan adalah pemeriksaan kualitas hasil pengujian melalui perhitungan kesetimbangan kation (K)-anion (A) dengan batas toleransi kesalahan (e) analisis kualitas air maksimal $\pm 5\%$ [10].

$$e (\%) = \frac{(\sum K - \sum A)}{(\sum K + \sum A)} \times 100\% \leq \pm 5\% \quad (2)$$

Parameter kation-anion akan dianalisis keakuratannya melalui diagram kesetimbangan ion sedangkan

keterkaitannya dengan tipe/fasies air diplot pada Diagram Piper menggunakan perangkat lunak *The Geochemist's Workbench*. Karakterisasi awal kualitas air akan digunakan untuk input simulasi pencampuran. Hasil simulasi pencampuran air dengan PHREEQC lainnya berupa diagram spesiasi dan indeks saturasi yang akan ditinjau untuk mengetahui faktor geokimia yang mempengaruhi sedimentasi pada proses pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan AAT.

Pengujian Kualitas Air

Pengujian kualitas air melalui analisis laboratorium dominan dilakukan pada tahap awal untuk mendapatkan basis data awal sebelum dilakukan simulasi pencampuran sedangkan supernatan hasil pencampuran *Jar Test* akan diukur parameter pH, kekeruhan, dan logam terlarut. Parameter kualitas air awal yang diuji meliputi pH, potensial redoks (ORP), dan temperatur menggunakan Multiparameter Oakton WD 35413-00 PC-700. Kekeruhan diukur dengan *Turbidity meter* Lutron TU-2016 sedangkan asiditas dan alkalinitas total diukur dengan metode analisis basah/titrimetri sesuai SNI 06-2420-2004. Konsentrasi kation dan anion mayor diukur dengan ion kromatografi (*Ion Chromatography Metrohm 930*) sedangkan Silika (SiO_2) dan logam terlarut, seperti aluminium (Al), besi (Fe), dan mangan (Mn) diukur dengan *Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)* Shimadzu seri AA 6300, sesuai prosedur dalam APHA 4500 C, 3113 B, dan 3111 B [11]. Konsentrasi logam terlarut dan nilai pH akan dibandingkan dengan baku mutu kualitas air pertambangan batubara dalam Perda Provinsi Kalimantan Timur No. 2 Tahun 2011.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Awal Kualitas Air

Berdasarkan klasifikasi jenis air tambang dalam *GARD Guide* [12], karakteristik AAT sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 1 menunjukkan karakteristik *acid mine drainage (AMD)* karena memiliki pH rendah sebesar 4,36 ($\text{pH} < 6$) dan memiliki kandungan sulfat maupun logam terlarut yang relatif tinggi. Kualitas AAT memiliki asiditas 23,8 mg/L. Asiditas disebabkan oleh pelarutan CO_2 dan ion H^+ yang merupakan produk dari reaksi oksidasi pirit [10]. Tingginya logam terlarut ditunjukkan dengan konsentrasi Mn pada sampel AAT sebesar 6,33 mg/L yang telah melampaui baku mutu (konsentrasi Mn < 4 mg/L). Kualitas AAT memiliki nilai ORP positif yang menunjukkan posisinya sebagai agen pengoksidasi yang dapat mengikat elektron. Hal tersebut ditunjukkan dengan kecenderungan konsentrasi kation yang lebih tinggi pada sampel AAT yang dapat menunjang perannya sebagai koagulan.

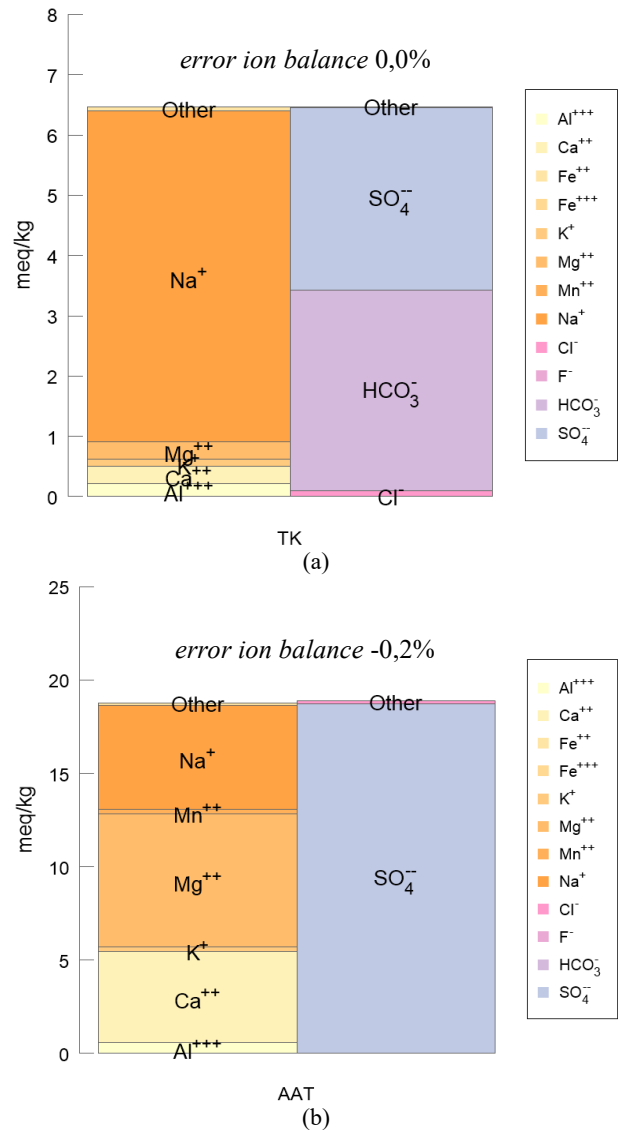
Di sisi lain, air TK menunjukkan karakteristik *neutral mine drainage (NMD)* karena kecenderungan pH alkali

dengan konsentrasi sulfat dan logam terlarut lebih rendah dibandingkan AAT yang umumnya disebabkan pelarutan mineral sekunder [10]. Karakteristik air TK memiliki kekeruhan yang tinggi. Di sisi lain, sampel air TK pada pH 8,05 memiliki alkalinitas yang didominasi bikarbonat (HCO_3^-) sebagai penyangga pH [10,12]. ORP yang bernilai negatif pada karakteristik air TK menunjukkan posisinya sebagai agen pereduksi yang berperan melepaskan elektron. Hal tersebut menunjukkan stabilitas koloid yang didominasi muatan ion negatif sehingga tinggi kekeruhannya.

Tabel 1. Karakterisasi awal kualitas air

No.	Parameter	Konsentrasi	
		TK	AAT
Parameter fisik			
1.	Turbiditas/kekeruhan (NTU)	721	12,33
2.	ORP (mV)	-62,5	158,8
3.	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	26,7	26,7
Parameter kimia			
1.	pH	8,05	4,36
2.	Alkalinitas total (mg/L CaCO_3)	165,57	<0,05
3.	Asiditas total (mg/L CaCO_3)	<0,05	23,8
4.	Na^+ (mg/L)	125,61	128,13
5.	Ca^{+2} (mg/L)	5,61	97,42
6.	Mg^{+2} (mg/L)	3,48	86,49
7.	K^+ (mg/L)	4,73	8,58
8.	SO_4^{-2} (mg/L)	145,15	895,87
9.	Cl^- (mg/L)	3,35	2,79
10.	HCO_3^- (mg/L)	202,19	<0,05
11.	F^- (mg/L)	0,2	1,41
12.	Al (mg/L)	1,95	5,28
13.	Fe (mg/L)	0,91	3,11
14.	Mn (mg/L)	0,92	6,33

Berdasarkan prinsip kesetimbangan kation anion, karakteristik kualitas air sampel TK dan AAT memiliki tingkat toleransi kesalahan di bawah 5%. Hal tersebut menunjukkan bahwa keakuratan analisis pengujian bersifat baik. Dari diagram kesetimbangan ion dalam Gambar 2, air TK memiliki dominansi fasies kation $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > \text{K}^+$ dengan anion $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^-$. Hal tersebut sejalan dengan uraian Tabel 2 bahwa logam alkali melebihi alkali tanah pada fasies kation dan ion kabanat/bikarbonat melebihi asam kuat pada fasies anion pada karakteristik air TK.



Gambar 2. Diagram Kesetimbangan Ion (a) air TK; (b) AAT.

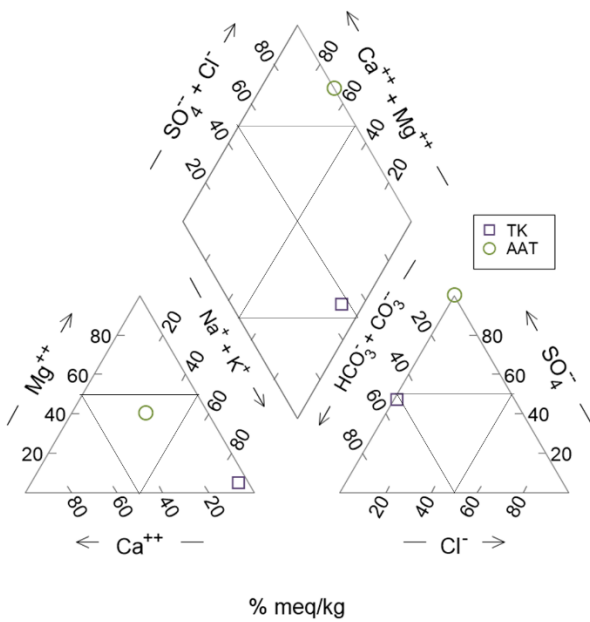
Dibandingkan dengan karakteristik air TK, AAT memiliki dominansi fasies kation dengan urutan $\text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{K}^+$ sedangkan fasies anion didominasi $\text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ sebagaimana deskripsi Gambar 2.

Tabel 2. Tipe Air berdasarkan Diagram Piper

No.	Sampel	Fasies Kation		Fasies Anion	Tipe Air
1.	Air TK	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Alkali > Alkali tanah	HCO_3^-	Natrium bikarbonat $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{HCO}_3^-$
2.	AAT	No dominant	Alkali tanah > Alkali	SO_4^{-2}	Kalsium sulfat $\text{Ca}^{+2} - \text{Mg}^{+2} - \text{SO}_4^{-2}$

Hal tersebut sejalan dengan plot Diagram Piper bahwa alkali tanah melebihi alkali pada fasies kation dan sulfat lebih besar daripada karbonat/bikarbonat sebagaimana ditunjukkan pada uraian Tabel 2.

Hasil plot Diagram Piper dalam Gambar 3 menunjukkan bahwa sampel air TK adalah tipe air natrium-bikarbonat sedangkan AAT adalah tipe air kalsium-sulfat. Dominasi Na^+ dalam kualitas air TK dapat diakibatkan disolusi mineral albit atau mineral silikat lainnya dan pertukaran ion sedangkan HCO_3^- disebabkan air hujan dan disolusi mineral karbonat [10,13]. Dominansi Ca^{+2} dan Mg^{+2} dalam AAT dapat disebabkan disolusi mineral karbonat sedangkan SO_4^{-2} berasal dari produk oksidasi pirit atau disolusi gipsum [2,10,12].

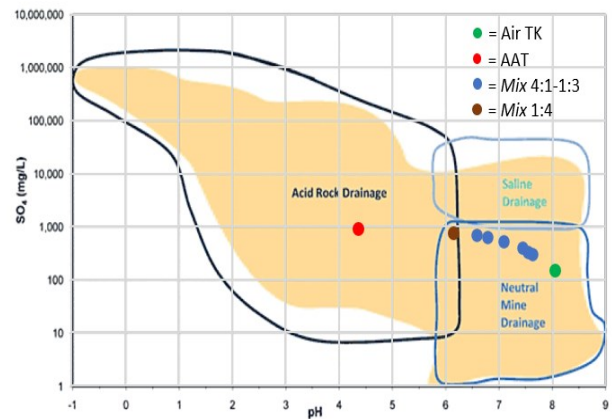


Gambar 3. Plot pada Diagram Piper untuk Sampel Air TK dan AAT.

Perubahan Kualitas Air Pasca Pencampuran

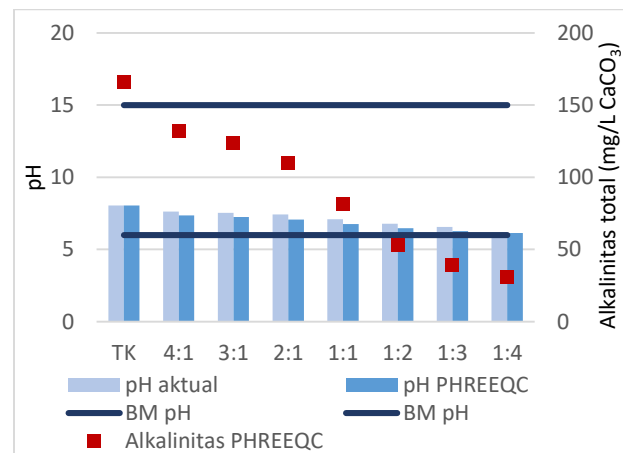
Hasil simulasi pencampuran berdasarkan simulasi PHREEQC dengan input karakteristik awal menunjukkan kesetimbangan kation-anion tidak melampaui $\pm 5\%$. Klasifikasi air hasil simulasi pencampuran dengan PHREEQC berdasarkan konsentrasi sulfat terhadap pH dalam Diagram Ficklin [10] menunjukkan bahwa rasio pencampuran air TK:AAT sebesar 1:4 berada dalam zona peralihan antara karakteristik NMD dan AAT. Penurunan pH mendekati karakteristik AAT diikuti dengan peningkatan konsentrasi sulfat dalam supernatan. Pada rasio pencampuran sebesar 1:3 – 4:1, supernatan masih diklasifikasikan sebagai NMD.

Pengaruh pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan AAT memiliki pengaruh terhadap perubahan pH, penurunan kekeruhan, dan penyisihan logam terlarut.



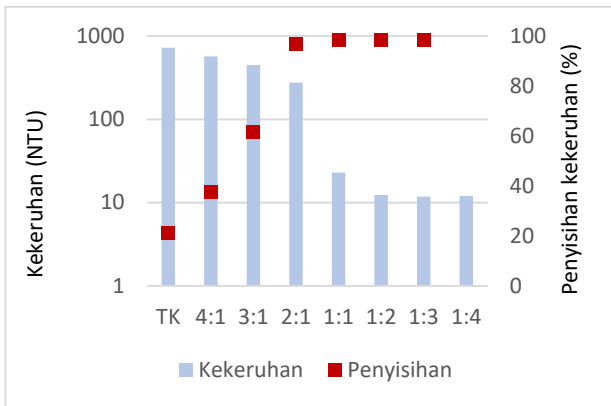
Gambar 4. Plot Hasil Pencampuran Diagram Ficklin (nilai SO_4 terhadap pH) dan Tipe Air Tambang (*Acid Mine Drainage*, *Neutral Mine Drainage* dan *Saline Drainage*).

Prinsip penyisihan logam terlarut adalah mengubah kandungan logam terlarut menjadi logam tak larut [10]. Alkalinitas berperan sebagai penyangga pH dalam proses pengendapan karena solubilitas logam terlarut dipengaruhi kondisi pH [12]. Hasil pencampuran menunjukkan semakin banyak volume AAT yang ditambahkan ke dalam rasio pencampuran menyebabkan penurunan pH dan alkalinitas. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh alkalinitas dalam proses pengikatan antar-ion untuk menurunkan kekeruhan.



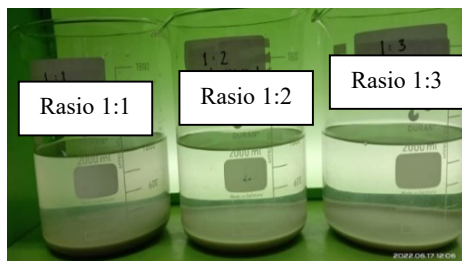
Gambar 5. pH dan alkalinitas hasil pencampuran.

Kualitas air supernatan dalam Gambar 6 menunjukkan tingkat penyisihan kekeruhan melebihi 90% pada rentang rasio pencampuran air TK:AAT sebesar 1:1 – 1:4. Kekeruhan dalam supernatan berhubungan dengan TSS berupa partikel koloid yang termasuk pada *non-settleable solids*. Penyisihan kekeruhan menunjukkan adanya koagulasi melalui mekanisme destabilisasi sistem koloid [7,9].

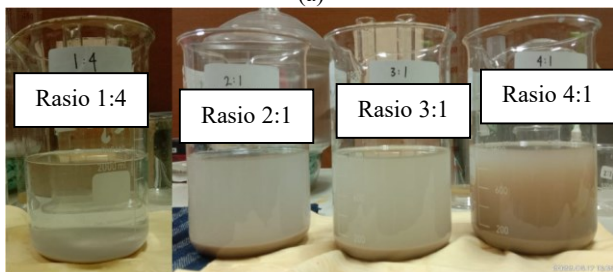


Gambar 6. Tingkat Penyisihan Kekeuhan Hasil Jar Test

Kekeuhan memiliki hubungan berbanding terbalik dengan *Total Dissolved Solids* (TDS) sedangkan kandungan logam terlarut berbanding lurus dengan TDS [14]. Beberapa variasi hasil pencampuran air TK:AAT melalui simulasi Jar Test dapat menunjukkan perbedaan kekeuhan supernatan pada pengamatan 15 menit pengendapan setelah pengadukan cepat dan lambat (Gambar 7).



(a)

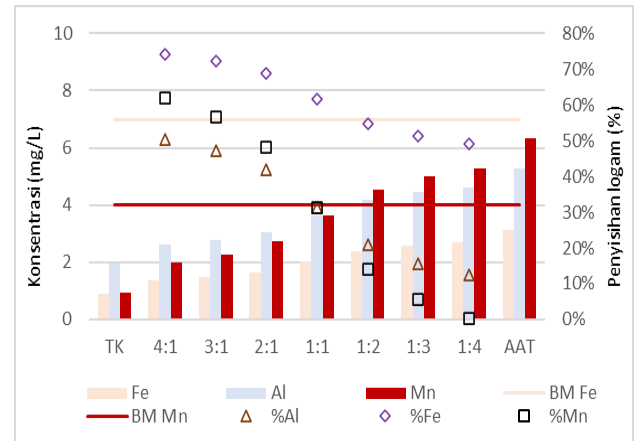


(b)

Gambar 7. Kenampakan Fisik Kekeuhan Supernatan Hasil Pencampuran (a) Rasio 1:1-1:3; (b) Rasio 1:4,2:1-4:1

Pada pencampuran, nilai pH memengaruhi kelarutan logam. Pada umumnya, reaksi pengendapan logam terlarut terjadi pada rentang pH 7 – 9 sehingga mekanisme penyisihan logam diawali dengan perubahan nilai pH yang disesuaikan dengan target penyisihan logam terlarut [10]. Nilai pH yang semakin rendah akibat penambahan AAT dalam rasio pencampuran mengakibatkan kandungan logam terlarut meningkat sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 8. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi volume AAT dalam rasio

pencampuran berdampak efektif terhadap penyisihan kandungan logam tak larut (*insoluble metal*) yang terikat pada flok partikel tersuspensi tetapi masih meninggalkan peningkatan logam terlarut yang menjadi isu pengelolaan.

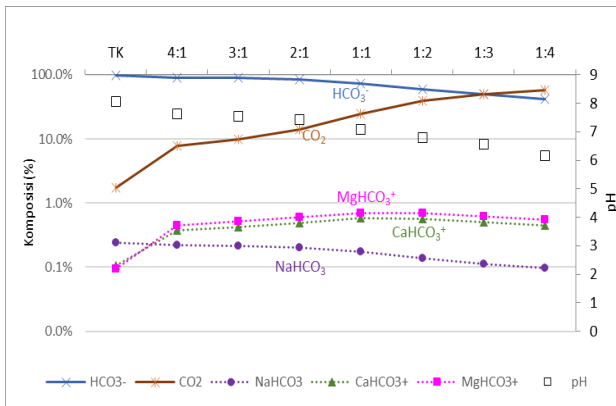


Gambar 8. Logam terlarut (Fe, Mn dan Al) hasil pencampuran PHREEQC

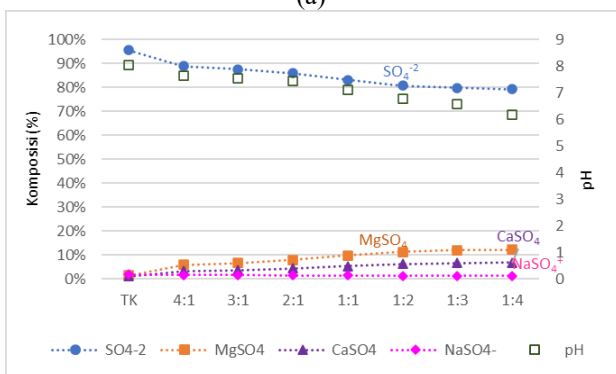
Oleh karena itu, rasio pencampuran yang optimum menjadi suatu pertimbangan yang penting dalam pelaksanaan alternatif pengolahan ini agar efluen hasil pencampuran antara air tambang kekeuhan tinggi dan air asam tambang dapat memenuhi baku mutu. Perubahan pH hasil pencampuran air TK:AAT pada seluruh rentang rasio 4:1 – 1:4 masih memenuhi baku mutu seperti uraian dalam Gambar 5 sedangkan tingkat penyisihan kekeuhan yang tinggi berkisar 96,8 – 98,3% ditunjukkan pada rasio 1:1 – 1:4 seperti deskripsi dalam Gambar 6. Akan tetapi, penyisihan logam terlarut seperti Fe dan Mn pada hasil pencampuran yang masih memenuhi baku mutu adalah rasio 4:1 – 1:1 dengan tingkat penyisihan Fe sebesar 61,7 – 74,3% dan tingkat penyisihan Mn sekitar 31,1 – 61,9% dibandingkan karakteristik awal AAT sebagaimana tertera dalam Gambar 8. Oleh karena itu, rasio optimum yang merupakan irisan dari ketiga parameter di atas berada pada rasio pencampuran TK:AAT sebesar 1:1.

Pengaruh Faktor Geokimia

Untuk memahami reaksi geokimia yang terjadi dalam mekanisme koagulasi-flokulasi pada proses pencampuran air tambang kekeuhan tinggi dan AAT maka analisis spesies anion dilakukan, seperti bikarbonat dan sulfat sebagaimana fasies anion yang mendominasi karakteristik air. Dalam prinsip alkalinitas, spesies karbonat dipengaruhi oleh perubahan pH. Alkalinitas pada nilai pH antara 4,5 – 8,3 didominasi bikarbonat [10]. Pengaruh alkalinitas dalam reaksi pengikatan ion mengakibatkan penurunan kekeuhan [15]. Hal tersebut ditunjukkan keterkaitannya dengan keberadaan sulfat sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 9.



(a)



(b)

Gambar 9. Diagram Spesiiasi (a) Karbonat; (b) Sulfat

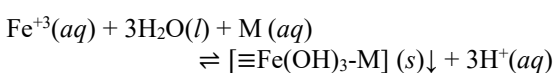
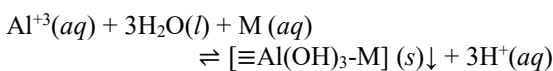
Hubungan bikarbonat dan sulfat berdasarkan diagram spesiasi dalam Gambar 9 dijelaskan dalam reaksi berikut.

$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 2\text{CO}_2(\text{g})$$

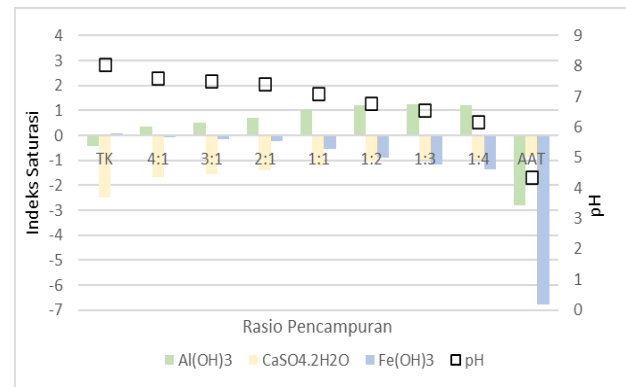
Reaksi tersebut menunjukkan bahwa seiring bertambahnya volume AAT dalam rasio pencampuran air TK:AAT berdampak terhadap:

1. Komposisi konsentrasi HCO_3^- dan SO_4^{2-} bebas sebagai pereaksi berkurang dan digantikan dengan peningkatan hasil reaksi berupa ikatan kation- SO_4 dan CO_2 .
2. Kation alkali tanah (Ca^{+2} dan Mg^{+2}) memiliki valensi yang lebih besar daripada alkali (Na^+) sehingga cenderung lebih kuat mengikat anion. Hal tersebut menyebabkan komposisi kandungan ikatan alkali tanah-anion lebih tinggi dibandingkan ikatan alkali-anion.

Pada kondisi tersebut, ion Al^{+3} dan Fe^{+3} dalam air terhidrolisis membentuk presipitat senyawa hidroksida [4] yang dapat mengadsorpsi kation lainnya (M) [7] dengan reaksi sebagai berikut.



Oleh karena itu, analisis endapan pada produk reaksi tersebut ditinjau pada nilai indeks saturasi hasil simulasi pencampuran dalam PHREEQC. Indeks saturasi dapat menggambarkan kejenuhan suatu sistem air yang menyebabkan kecenderungan interaksi suatu senyawa dalam kondisi terlarut atau terendapkan [7,10]. Jika nilai indeks saturasi (SI) lebih besar dari 0 menunjukkan kecenderungan kondisi air *oversaturated* [10]. Dari hasil simulasi PHREEQC, $\text{Al}(\text{OH})_3$ memiliki nilai SI positif pada seluruh rasio pencampuran dalam Gambar 10. Hal tersebut menunjukkan kecenderungan $\text{Al}(\text{OH})_3$ untuk mengendap lebih besar daripada yang terlarut.

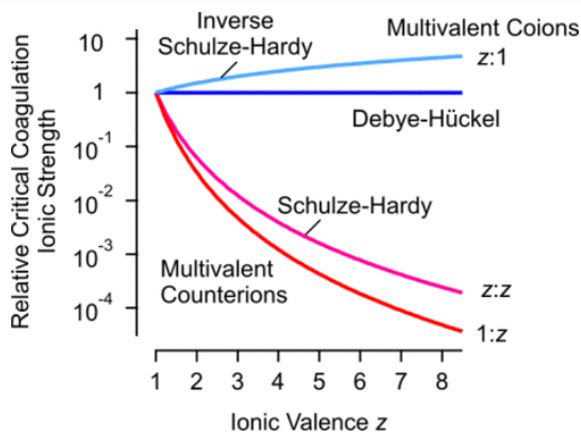


Gambar 10. Grafik Indeks Sturasi/Saturation Indices, SI untuk mineral terpilih: Alumunium hidroksida $\text{Al}(\text{OH})_3$; Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); dan Besi hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), terhadap nilai pH.

Akan tetapi, nilai SI pada $\text{Fe}(\text{OH})_3$ menunjukkan kecenderungan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bernilai negatif seiring dengan penambahan AAT dalam rasio pencampuran. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecenderungan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ untuk terlarut lebih besar daripada yang mengendap. Kecilnya tingkat pembentukan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ karena unsur Fe yang disimulasikan dalam PHREEQC didominasi oleh 99% dalam bentuk Fe^{+2} dan 1% dalam bentuk Fe^{+3} yang solubilitasnya turut dipengaruhi perubahan pH.

Berdasarkan nilai SI gipsum, kecenderungan gipsum terlarut lebih besar daripada yang mengendap. Akan tetapi, pergeseran nilai SI mendekati 0 terjadi seiring dengan semakin bertambahnya volume AAT pada pencampuran sehingga endapan gipsum tetap masih dapat terbentuk, walaupun dalam jumlah terbatas.

Dosis koagulan yang efektif dipengaruhi oleh muatan elektrolitnya (valensi) menurut Hukum Schulze-Hardy [16] seperti yang dideskripsikan dalam Gambar 11. Pada perbandingan kation di atas, dosis koagulan untuk Fe dengan dominansi Fe^{+2} dan Fe^{+3} minor, serta Al^{+3} memiliki perbedaan efektivitas logaritmik -2 dan -3 sehingga dari ketiga elektrolit tersebut, Al^{+3} memiliki kemampuan koagulasi tertinggi [8,10,17].



Gambar 11. Grafik Valensi Ion Terhadap Kuat-Ion Kritis Relatif untuk Koagulasi (valensi Fe=2,3, Al=3) [16]

KESIMPULAN

Pencampuran air tambang kekeruhan tinggi dengan air asam tambang pada rasio pencampuran optimum air TK:AAT sebesar 1:1 terbukti dapat menyisihkan kekeruhan hingga 96,8% dengan nilai pH dan kandungan logam terlarut yang memenuhi baku mutu. Adapun faktor geokimia yang berperan dalam proses pengendapan tak hanya melibatkan kation valensi tinggi seperti Al^{+3} , tetapi juga sulfat dan alkalinitas (bikarbonat) sebagai pereaksinya. Hasil proses pengendapan menghasilkan presipitat seperti logam hidroksida dan gipsum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Pendidikan (LPDP) yang telah memberi dukungan finansial terhadap penelitian ini, perusahaan terkait yang membantu pengambilan sampel, dan pihak laboratorium ITB yang telah menyediakan akses fasilitas dan jasa analisis laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Abfertiawan,S., Tonanga,T.(2017). *Mineral Lempung dalam Peningkatan Kekeruhan Air Tambang*. Ganeca Environmental Services. (<https://www.gesi.co.id/mineral-lempung-dalam-peningkatan-kekeruhan-air-tambang/>) diakses pada 5 September 2022.

[2] Gautama, R.S. (2014). *Pembentukan, Pengendalian, dan Pengelolaan Air Asam Tambang*. ITB Press.

[3] Yuri,U., Herumurti,W. (2012). *Penggunaan Air Asam Tambang sebagai Koagulan dalam Pengolahan Air Run Off Pertambangan Batubara dengan Koagulasi Dua Tahap*. Skripsi. ITS.

[4] Septiariva,I. (2014). *Pengaruh Penggunaan Koagulan Air Asam Tambang dalam Pengolahan Air Run Off Pertambangan Batubara*. Skripsi. ITS.

[5] Fondriest.(2022).(<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>) diakses pada 5 September 2022.

[6] Alemayehu B, Teshome H.(2021).*Soil Colloids, Types and Their Properties:A review*.Open J Bioinform Biostat 5(1):008-013.

[7] Partheniades, E. (2009). *Forces between Clay Particles and the Process of Flocculation*. *Journal of Cohesive Sediments in Open Channels*, 47-58.

[8] Qurniawan,R. (2020). *Studi Pengelolaan Air Tambang Terintegrasi (Pencampuran Air Tambang Tinggi TSS dengan Air Tambang Tinggi Sulfat)*. Tesis. ITB.

[9] Ravina,L.(1993). *Coagulation and Flocculation 4th Edition*. Virginia. Zeta-Meter, Inc.

[10] Hounslow,A.(1995).*Water Quality Data Analysis and Interpretation*. CRC Press, Boca Raton.

[11] *American Public Health Association (APHA)*. (2005). *Standard Methods of for Examination of Water and Wastewater 21st edition*, Washington DC.

[12] *International Network for Acid Prevention*.(2009). *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*. INAP.

[13] Badhurahman,A.(2018). *Persebaran Kualitas Air di Daerah Aliran Sungai Cikapundung*. Temu Ahli Persatuan Ahli Airtanah Indonesia.

[14] Dasharath,D. (2006). *Relation between turbidity and total dissolved solids based on flow rate of the godawari water*. *Journal of Ultra Chemistry Vol 2*, 45-48.

[15] Poon, H.Y., Cossey,H.L.,Balaberda,A.,Ulrich,A.C. (2021).*The Role of Carbonate Mineral Dissolution in Turbidity Reduction in an Oil Sands End Pit Lake*. University of Alberta. Canada.

[16] Trefalt, G., Szilagyi, I., Tellez, G., Borkovec, M. (2017). *Colloidal Stability in Asymmetric Electrolytes:Modifications of the Schulze-Hardy Rule*. Langmuir. ACS Publications.

[17] Wei,K., Cossey, H.L., Ulrich, A.C.(2021). *Effects of Calcium and Aluminum on Particle Settling in an Oil Sands End Pit Lake*. *Journal of Mine Water and the Environment*. Kanada.