



KINERJA PENETRALAN AIR ASAM TAMBANG PADA *OPEN LIMESTONE CHANNEL* DENGAN PENAMBAHAN ZEOLIT

NEUTRALIZATION PERFORMANCE OF ACID MINE DRAINAGE IN OPEN LIMESTONE CHANNEL WITH ADDITION OF ZEOLITE

F. Hilwani¹, A. Badhurahman², G.J. Kusuma³, R.S. Gautama⁴

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

^{2,3,4} Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

¹⁻⁴Jl. Ganesa No.10, Bandung (40132), Telp. (022) 2506282, Fax. (022) 2514922

e-mail: *¹hilwanifajriah@gmail.com, ²abiebadhurahman@gmail.com, ³jaluku@itb.ac.id, ⁴r_sayoga@mining.itb.ac.id

ABSTRAK

Air Asam Tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan yang dihadapi di dunia pertambangan. Untuk itu perlu dilakukan pengolahan AAT guna menjamin kualitas air keluaran hasil kegiatan pertambangan. Salah satu metode pengolahan AAT yang telah banyak digunakan adalah pengolahan secara pasif menggunakan *Open Limestone Channel* (OLC). Namun pada sistem tersebut terdapat kekhawatiran mengenai lapisan oksida besi pada permukaan *limestone*. Endapan oksida besi telah menyebabkan kegagalan pada banyak sistem pengolahan pasif OLC. Hal ini terjadi karena endapan oksida besi menyelubungi permukaan *limestone* dan menghambat pelarutan lebih lanjut sehingga mengganggu kinerja penetralan AAT. Oleh karena itu diperlukan suatu rekayasa pada sistem OLC untuk mengurangi pengendapan oksida besi dan mempertahankan efektivitas sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran zeolit dalam mengurangi pengendapan oksida besi pada permukaan *limestone* dan meningkatkan kemampuan penetralan asam dalam sistem melalui pertukaran ion. Metode dalam penelitian ini adalah metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Pengumpulan data didasarkan atas simulasi OLC dan analisis laboratorium. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan zeolit di pangkal saluran OLC terbukti mengurangi pembentukan oksida besi pada permukaan *limestone* dan meningkatkan kemampuan penetralan asam. Saluran terefektif dari model OLC yang dikaji adalah saluran LSZ yang mampu mencapai pH tertinggi sebesar 7,92 di awal pengujian dan 7,20 di akhir pengujian. Kemampuan penetralan ini berbanding lurus dengan luas permukaan *limestone* dan zeolit yang akan melepaskan bahan alkalin saat berkontak dengan AAT.

Kata kunci: OLC, *limestone*, zeolit, penetralan asam, oksida besi

ABSTRACT

Acid Mine Drainage (AMD) is one of the problems in mining activity. Management of AMD is important to be carried out during mining activity and after mine closure to ensure the quality of effluent water from mining. One method of AMD treatment has been widely used is passive treatment by using OLC. However, in this system there is concern about the iron oxide layer on limestone surface. Precipitation of iron oxide has caused the failure of many passive limestone treatment systems. This occurs because iron oxide encapsulated the limestone grains and inhibit further dissolution so affected AMD neutralization performance. Therefore it is necessary to modify an open limestone channel system to reduce iron oxide precipitation and maintain the effectiveness of the system. This study aims to analyze the contribution of zeolite in reducing the precipitation of iron oxide on limestone surface and increasing the ability of acid neutralization by ion exchange. The method in this research is an experimental which carried out in laboratory. Data collection is based on OLC simulation and laboratory analysis. Based on simulation, addition of zeolite at the beginning of the channel reduced deposition iron oxide on limestone surface and increased the ability of acid neutralization. LSZ channel has appeared as the most effective OLC model by attaining the highest pH of 7.92 at the beginning and 7.20 at the end simulation. The acid neutralization performance was proportional to the surface area of limestone and zeolite which would release alkaline materials when reacting with AMD.

Keywords: OLC, *limestone*, zeolite, acid neutralization, iron oxide

PENDAHULUAN

Air Asam Tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang dihadapi di dunia pertambangan, salah satunya pada tambang batubara. Pengolahan AAT perlu dilakukan selama kegiatan penambangan berlangsung maupun setelah kegiatan penambangan berakhir. Pengolahan AAT seringkali kompleks, memerlukan biaya yang mahal, dan menantang [1]. Secara umum terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk pengolahan AAT, yaitu pengolahan secara aktif dan pasif. Pengolahan secara aktif menggunakan bahan kimia, sedangkan pengolahan secara pasif menggunakan media yang berproses secara alami [2]. Pengolahan AAT secara aktif cenderung mengeluarkan biaya yang besar karena membutuhkan persediaan agen penetral, energi yang besar, dan orang untuk mengelola [3]. Sementara, pengolahan AAT secara pasif memerlukan biaya dan pemeliharaan yang lebih sedikit dibandingkan dengan pengolahan secara aktif [2].

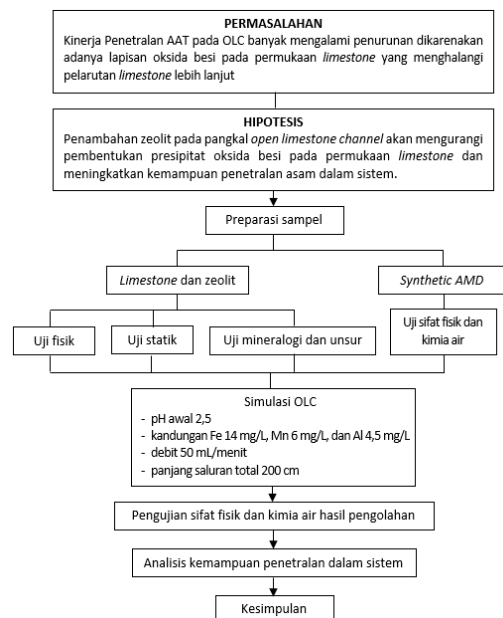
Pada kasus pengolahan AAT secara pasif yang menggunakan saluran, maka *limestone* merupakan material yang umum digunakan untuk menetralisasi AAT. Hal ini dikarenakan *limestone* menawarkan harga yang lebih murah dan tingkat netralisasi yang cukup memuaskan [4, 5]. Namun, sistem yang menggunakan *limestone* rentan terhadap pembentukan lapisan oksida besi pada permukaan *limestone*, khususnya pada *Open Limestone Channel* (OLC) [6]. Penghilangan ion H^+ secara otomatis akan mendukung reaksi pengendapan Fe, sehingga pengolahan AAT yang menggunakan *limestone* akan menyebabkan presipitasi oksida besi pada permukaan *limestone* [7].

Endapan oksida besi telah menyebabkan kegagalan pada banyak sistem pengolahan pasif yang menggunakan *limestone*. Hal ini terjadi karena endapan oksida besi menyelubungi butiran *limestone* dan menghambat pelarutan lebih lanjut [7, 8]. Oleh karena itu diperlukan suatu rekayasa pada sistem OLC untuk mengurangi pengendapan oksida besi dan mempertahankan penetralan AAT pada sistem. Berdasarkan studi literatur, pengendapan oksida besi pada *limestone* dapat dikurangi melalui sistem pertukaran ion. Dari berbagai macam penukar ion yang ada, zeolit merupakan pilihan yang cocok karena memiliki kapasitas pertukaran kation yang besar dan memiliki afinitas untuk logam berat [9]. Zeolit sendiri merupakan mineral kristal alumina silika tetrahidrat berpori yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi, terbentuk oleh tetrahedral $[SiO_4]^{4-}$ dan $[AlO_4]^{5-}$ yang saling berhubungan oleh atom-atom oksigen sedemikian rupa, sehingga membentuk kerangka tiga dimensi terbuka [10]. Bentuk kristal zeolit yang sangat teratur dengan rongga yang saling berhubungan ke segala arah, menyebabkan zeolit memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi, sehingga zeolit dapat dimanfaatkan sebagai agen adsorpsi logam [11].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Motsi (2010) menunjukkan bahwa pengolahan AAT menggunakan zeolit utamanya memanfaatkan reaksi pertukaran ion, yang mana kation yang dapat ditukar pada struktur zeolit (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+}) digantikan oleh kation logam berat seperti timbal, besi, aluminium, mangan, tembaga dan nikel. Penelitiannya juga membuktikan bahwa selain mekanisme tukar ion, presipitasi logam pada struktur zeolit juga dapat terjadi seperti pengendapan logam besi yang terjadi ketika pH minimum dicapai sebesar 4,3 [12]. Selanjutnya pada penelitian yang dilakukan oleh Rismiarti, dkk. (2016) terhadap absorpsi ion Fe^{3+} pada permukaan zeolit, menunjukkan bahwa adsorpsi ion Fe^{3+} sangat dipengaruhi pH. Semakin meningkatnya pH, maka adsorpsi ion Fe^{3+} akan semakin berkurang karena pada pH dekat netral ion Fe^{3+} cenderung membentuk endapan oksida besi [10]. Selanjutnya penelitian yang berhubungan dengan material *limestone* dan zeolit dilakukan oleh Silva, dkk. (2021), yang mana pencampuran antara *limestone* dan zeolit dapat meningkatkan penetralan AAT dan menghilangkan ion-ion polutan dalam AAT [13]. Dalam penelitian ini, akan dikaji lebih lanjut terkait efektivitas penetralan sistem OLC dengan dan tanpa penggunaan zeolit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran zeolit dalam mengurangi pengendapan oksida besi yang menyebabkan *armoring* pada permukaan *limestone* dan dampaknya terhadap kemampuan penetralan asam dalam sistem melalui pertukaran ion.

METODE PENELITIAN

Penelitian tersebut dilaksanakan pada skala laboratorium, yaitu pada Laboratorium Lingkungan Tambang Institut Teknologi Bandung dengan digram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 1.



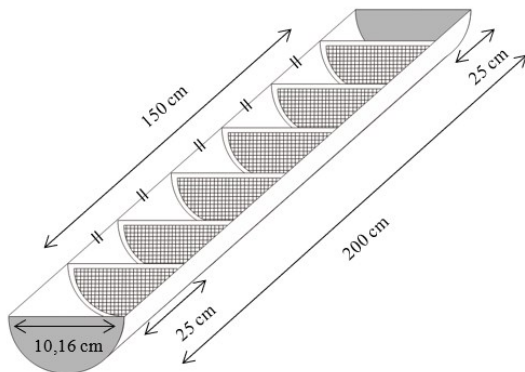
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penelitian tersebut dilakukan kurang lebih selama satu bulan pada periode bulan September-Oktober 2022, meliputi: pembuatan air asam tambang buatan (*synthetic acid mine drainage*), simulasi saluran kontrol zeolit dan OLC, pengujian sifat fisik air hingga konsentrasi alkali. Terdapat dua jenis data penelitian yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari pengamatan, pengukuran dan pengujian langsung di laboratorium. Sementara data sekunder diperoleh dari studi literatur yang telah dilakukan.

Rancangan Penelitian

a) Saluran Terbuka

Saluran terbuka dalam penelitian ini dibuat dari bahan PVC yang *inert*/tidak bereaksi dengan AAT maupun dengan batuan. Saluran terbuka tersebut berbentuk setengah lingkaran dengan diameter ±10 cm dan panjang total 200 cm (Gambar 2). Pemilihan panjang saluran tersebut untuk meningkatkan waktu kontak antara *limestone* maupun zeolit dengan AAT buatan. Tujuan yang sama diterapkan pada pemilihan kemiringan (*slope*), sehingga digunakan *slope* yang kecil yaitu sebesar 0,8% [14].



Gambar 2. Desain saluran terbuka dalam penelitian ini

Saluran terbuka ini menggunakan kisi nilon sebagai pembatas dengan ukuran nominal bukaan 1,5 mm. Pembatas tersebut berfungsi untuk menahan tiap bagian batuan dalam saluran tidak bergerak ke kompartemen lainnya. Bahan nilon dipilih untuk mencegah kisi ikut bereaksi saat terjadi kontak antara AAT dan batuan. Sementara pada awal dan akhir saluran digunakan dop PVC yang langsung terhubung dengan selang keluaran.

b) Material Limestone dan Zeolit

Limestone yang digunakan dalam pengujian ini berasal dari daerah Citatah, Padalarang, Provinsi Jawa Barat. Preparasi sampel *limestone* dilakukan di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian Institut Teknologi Bandung. Ukuran *limestone* yang digunakan dalam pengujian tersebut dibedakan atas dua ukuran butir yaitu ukuran butir besar (9,5–12,7 mm) dan ukuran kecil (4,75–9,5 mm) [15]. Jumlah *limestone* yang digunakan pada tiap

saluran terbuka adalah sebanyak 3,5 kg. Pada dua variasi ukuran butir *limestone* tersebut akan dilakukan pengukuran luas permukaan dengan mengambil 30 sampel butir *limestone* secara acak untuk tiap kelompok variasi ukuran butir. Selanjutnya luas permukaan per unit massa rata-rata dari butir *limestone* akan dihitung menggunakan persamaan 1, 2 dan 3 [7].

$$Surface\ area/unit\ mass = \frac{\pi D^2}{4m} \tag{1}$$

$$D = 2 \times \sqrt[3]{\frac{vol}{\pi}} \tag{2}$$

$$S = 1,15 - 0,25E \tag{3}$$

Dimana,

M = massa partikel *limestone* (g)

S = faktor ukuran/*shape factor of the particle*

D = diameter (cm)

E = perbandingan L (panjang maksimum) dan D

Zeolit yang digunakan dalam pengujian ini adalah zeolit domestik komersial yaitu zeolit alam. Pemilihan jenis zeolit ini dikarenakan keterdapatannya yang berlimpah dan harganya yang relatif murah. Ukuran zeolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah zeolit dengan ukuran 3,36 – 4,75 mm.

Pada dua dari empat OLC yang akan dikaji, zeolit diletakkan sepanjang 30 cm di awal saluran sebanyak 500 gram. Dengan demikian, perbandingan komposisi batuan dalam saluran tersebut adalah 12,5% zeolit dan 87,5% *limestone*. Komposisi tersebut dipilih guna melakukan pendekatan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Silva, dkk. (2021).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang mencampur zeolit dan *limestone*, penelitian ini menempatkan zeolit di awal saluran guna meningkatkan penyerapan logam terlarut khususnya Fe pada AAT sebelum bereaksi dengan *limestone*. Selain itu pada penelitian ini dilakukan variasi ukuran butir *limestone* untuk melihat efektivitasnya dalam penetralan AAT. Selanjutnya diharapkan *armoring* oksida besi pada permukaan *limestone* dapat dikurangi dengan peningkatan penyerapan ion besi oleh zeolit.

c) Synthetic Acid Mine Drainage

AAT yang digunakan dalam penelitian ini adalah air asam tambang buatan (*synthetic acid mine drainage*). Alasan pemilihan AAT buatan ini adalah fleksibilitas dalam penentuan parameter awal yang akan dikaji dalam penelitian seperti fokus terhadap peningkatan pH. Namun kualitas AAT buatan tersebut tetap mengacu pada kualitas AAT yang dapat diolah menggunakan OLC sesuai panduan dalam GARD (2014) seperti yang tertera pada Tabel 1 [16].

Tabel 1. Kualitas AAT pada OLC

Parameter	Kualitas dalam GARD (2014)	Kualitas AAT buatan
pH	<4,5	2,5
Fe (mg/L)	>1	14
Al (mg/L)	>1	4,5
Mn (mg/L)	<i>not specified</i>	6

Untuk menghasilkan konsentrasi logam terlarut sesuai dengan parameter yang telah ditentukan pada Tabel 1, maka pada *aquadest* ditambahkan Besi (III) Sulfat ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sebanyak 0,0523 g/L, Mangan (II) Sulfat ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sebanyak 0,0184 g/L dan Aluminium (III) Sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) sebanyak 0,0555 gr/L. Selanjutnya, untuk menghasilkan AAT dengan pH 2,5, maka dilakukan titrasi menggunakan H_2SO_4 1 N.

Desain Pengujian

Desain pengujian menggunakan tiga saluran kontrol zeolit dan empat variasi OLC dengan komposisi batuan yang berbeda. Saluran kontrol zeolit menggunakan zeolit dengan ukuran butir yang sama yaitu 3,36 – 4,75 mm, namun jumlah massa dan panjang saluran yang berbeda yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Model Simulasi Pengujian Zeolit

Saluran	Ukuran butir zeolit (mm)	Jumlah zeolit (g)	Panjang saluran (cm)
ZA	3,36 – 4,75	500	30
ZB	3,36 – 4,75	1.000	60
ZC	3,36 – 4,75	1.500	90

Untuk variasi OLC, saluran LB dan LS berisikan *limestone* dengan dua variasi ukuran butir, yaitu ukuran butir besar (9,5–12,7 mm) dan kecil (4,75–9,5 mm). Selanjutnya saluran LBZ dan LSZ berisikan *limestone* dengan dua variasi ukuran butir yang sama dengan saluran LB dan LS, namun dengan penambahan zeolit di pangkal saluran. Zeolit yang digunakan pada kedua saluran tersebut memiliki ukuran butir dan massa yang sama, yaitu ukuran 3,36-4,75 mm dan massa 500 gram. Model simulasi OLC dapat dilihat pada Tabel 3.

Pengujian akan dilakukan pada saluran terbuka dengan model pengisian batuan dimulai pada jarak 25 cm hingga 175 cm, yang terdiri dari lima kompartemen dengan pembatas nilon yang telah dijelaskan sebelumnya. Sementara kompartemen 25 cm di awal saluran dan 25 cm di akhir saluran tidak diisi batuan, yang berguna untuk menstabilkan aliran yang masuk dan keluar saluran.

Tabel 3. Model Simulasi OLC

Saluran	Ukuran butir <i>limestone</i> (mm)	Jumlah <i>limestone</i> (g)	Panjang saluran <i>limestone</i> (cm)	Jumlah zeolit (g)	Panjang saluran zeolit (cm)
LB	9,5 – 12,7	3.500	120	-	-
LBZ	9,5 – 12,7	3.500	120	500	30
LS	4,75 – 9,5	3.500	120	-	-
LSZ	4,75 – 9,5	3.500	120	500	30

Pengujian tersebut dilakukan selama 300 menit untuk tiap saluran dengan mengalirkan AAT buatan seperti yang telah ditentukan kualitasnya pada Tabel 1. AAT dialirkan ke dalam saluran menggunakan pompa peristaltik dengan debit 50 mL/menit. Dengan demikian, jumlah total AAT yang dialirkan pada tiap saluran adalah 15 L. Air keluaran dari tiap saluran ditampung tiap 20 menit hingga pengujian selesai. Selanjutnya air yang tertampung akan dilakukan analisis sifat fisik dan kimia air.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Mineralogi dan Unsur

Identifikasi mineral dan unsur dilakukan pada sampel *limestone* dan zeolit menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF) di Laboratorium Hidrogeologi dan Hidrogeokimia Institut Teknologi Bandung. Uji mineralogi menggunakan XRD dilakukan untuk mengetahui komposisi mineral pembentuk *limestone* dan zeolit. Berdasarkan hasil XRD, *limestone* yang digunakan dalam penelitian ini mengandung mineral kalsit (CaCO_3) sebagai mineral utama dan sedikit mineral kuarsa (SiO_2). Sementara untuk hasil uji mineralogi pada zeolit, menunjukkan bahwa zeolit alam yang digunakan dalam penelitian ini mengandung *Na-clinoptilolite* sebagai mineral dominan, diikuti oleh mineral kuarsa, *mordenite* dan *albite*.

Uji XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur sampel *limestone* dan zeolit secara non-destruktif. Berdasarkan hasil uji XRF, maka diperoleh komposisi kimia *limestone* yang didominasi oleh CaO sebesar 97,8% dengan kandungan SiO_2 sebesar 0,92% sebagai unsur pengotor terbesar. Sementara untuk zeolit didominasi oleh silika (SiO_2) sebesar 75,5% dan aluminium oksida (Al_2O_3) sebesar 12,60%. Kation dominan yang dapat ditukar (*exchangeable cations*) pada zeolit alami tersebut adalah Na^+ , K^+ , Mg^{2+} dan Ca^{2+} . Hasil uji XRF juga memperlihatkan besarnya Si/Al ratio (mol/mol) yaitu sebesar 5,09. Berdasarkan nilai perbandingan Si/Al, maka jenis zeolit ini termasuk dalam tipe klinoptilolit dengan besar nilai Si/Al antara 4 hingga 5,5 [12]. Tipe ini memiliki nilai *Theoretical Cation Exchange Capacity* (TCEC) atau kapasitas tukar kation secara teori sebesar 2,2 meq/g zeolit [17].

Karakteristik Geokimia Pembentukan dan Penetralkan AAT

Karakteristik geokimia pembentukan dan penetralan AAT dapat diketahui melalui uji statik. Uji statik adalah pengujian awal yang dilakukan untuk mengkarakterisasi batuan dengan cara menghitung neraca antara komponen pembentuk asam (mineral sulfida) dan komponen pengonsumsi asam (utamanya mineral karbonat) di dalam sampel batuan [18].

Berdasarkan hasil uji, nilai kapasitas penetralan asam atau ANC *limestone* sangat tinggi yaitu 941,56 kg H₂SO₄/ton (Tabel 4). Hal ini dikarenakan kehadiran mineral karbonat yang menjadi mineral utama penyusun *limestone*. Sementara nilai ANC zeolit adalah sebesar 11,24 kg H₂SO₄/ton. Kapasitas penetralan asam yang dimiliki oleh zeolit memang terbatas, namun jika dibandingkan dengan nilai potensi keasaman maksimum atau MPA yang dimiliki zeolit yaitu 0,009 kg H₂SO₄/ton maka potensi pembentukan asam neto atau NAPP zeolit bernilai negatif (-) yang berarti kandungan basa lebih besar daripada asam yang terbentuk. Mekanisme yang diharapkan dari zeolit pada OLC adalah pertukaran ion yang berdampak pada peningkatan pH dan penurunan konsentrasi logam terlarut.

Tabel 4. Hasil uji statik

No	Sampel batuan	pH pasta	TS (%)	MPA	ANC	NAPP
				(kg H ₂ SO ₄ /ton)		
1	Zeolit	5,93	0,03	0,009	11,24	-11,23
2	Limestone	9,15	0,02	0,006	941,56	-941,55

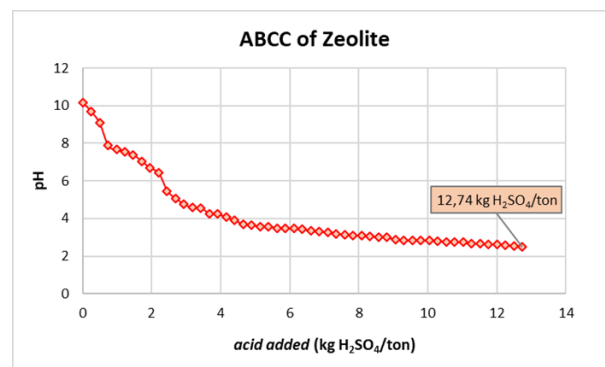
Keterangan: TS=Total Sulphur, MPA=Maximum Potential Acidity; ANC=Acid Neutralizing Capacity, NAPP=Net Acid Producing Potential

Karakteristik Penyanggaan Asam

Pada sampel batuan zeolit dan *limestone* juga dilakukan pengujian *Acid Buffering Characteristic Curve* (ABCC) untuk mengetahui karakteristik penyanggaan asam dari kedua sampel batuan. Pengujian tersebut dilakukan sesuai dengan prosedur Amira (2002), yaitu dengan melarutkan sampel berukuran <75µm seberat 2 g ke dalam akuades sebanyak 100 ml [19]. Kemudian dilakukan titrasi lambat pada sampel menggunakan asam (HCl) dengan terus melakukan pemantauan pH hingga mencapai nilai 2,50. Jumlah HCl yang ditambahkan disetarakan dengan jumlah ekuivalen kxg H₂SO₄/ton. Selanjutnya dilakukan plot antara jumlah asam yang ditambahkan (kg H₂SO₄/ton) dengan penurunan nilai pH yang terjadi.

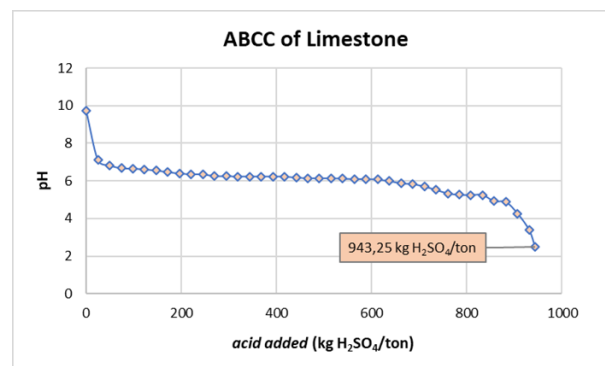
Gambar 3 menunjukkan respon penetralan sampel zeolit terhadap jumlah asam yang ditambahkan. Zeolit menunjukkan nilai pH yang tinggi di awal sebesar 10,18, namun mengalami penurunan drastis hingga pada pH sekitar 4 hanya dengan jumlah penambahan 4 kg

H₂SO₄/ton. Kemudian penurunan pH mulai melambat hingga akhir pengujian pada pH 2,50 dengan jumlah total penambahan asam sebanyak 12,74 kg H₂SO₄/ton. Hal tersebut sesuai dengan tahapan pembentukan dan penetralan asam yang diperkenalkan oleh GARD (2014), bahwa mineral alumino silikat mengambil peran pada tahap III yaitu sebagai *buffering* akhir pada pH antara 2,2 – 3,2 [16].



Gambar 3. Kurva karakteristik penyanggaan asam oleh zeolit

Respon penetralan terhadap asam jauh lebih baik ditunjukkan oleh *limestone* pada Gambar 4. Kapasitas penyanggaan asam oleh *limestone* mencapai 943,25 kg H₂SO₄/ton pada pH 2,50. *Limestone* mampu mempertahankan penyanggaan asam dengan menjaga kestabilan nilai pH sekitar 6 hingga penambahan asam sebanyak 637 kg H₂SO₄/ton. Hal tersebut juga sesuai dengan tahapan pembentukan dan penetralan asam yang dijelaskan oleh GARD (2014), yang mana konsumsi asam pada tahap I sangat mengandalkan mineral karbonat seperti kalsit [16].



Gambar 4. Kurva karakteristik penyanggaan asam oleh limestone

Luas Permukaan Limestone dan Zeolit

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan 1, 2 dan 3, maka didapatkan luas permukaan *limestone* dan zeolit seperti yang tertera pada Tabel 5. Luas permukaan *limestone* sangat dipengaruhi oleh ukuran

butir, yang mana semakin besar ukuran butir *limestone*, maka semakin kecil luas permukaan *limestone* yang dapat bereaksi. Sebaliknya, semakin kecil ukuran butir *limestone* maka semakin besar luas permukaan *limestone* yang dapat bereaksi menetralkan AAT [15].

Berbeda dengan *limestone*, faktor yang membedakan luas permukaan pada tiap saluran kontrol zeolit adalah jumlah massa zeolit dikarenakan penelitian ini menggunakan zeolit dengan ukuran butir yang seragam. Luas permukaan zeolit berhubungan luas bidang adsorpsi atau pertukaran ion yang tersedia selama AAT mengalir melewati saluran zeolit.

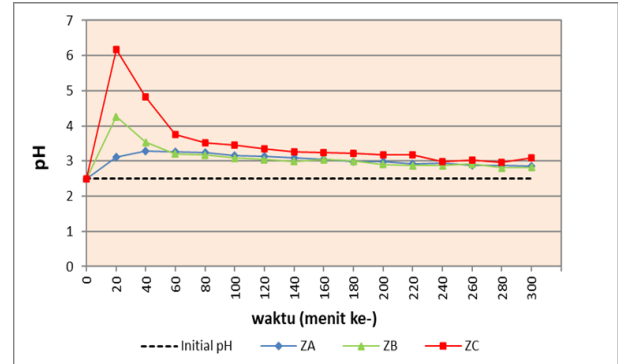
Tabel 5. Luas permukaan *limestone* dan zeolit

Ukuran butir (mm)	Massa batuan (g)	Luas permukaan per unit massa (cm ² /g)	Luas permukaan total	
			(cm ²)	(m ²)
<i>Limestone</i>				
9,5 – 12,7	3.500	2,57	8.978,46	0,90
4,75 – 9,5	3.500	4,41	15.446,86	1,54
<i>Zeolit</i>				
3,36 – 4,75	500	9,77	4.884,27	0,49
3,36 – 4,75	1.000	9,77	9.768,54	0,98
3,36 – 4,75	1.500	9,77	14.652,81	1,47

Kemampuan Penetralkan AAT

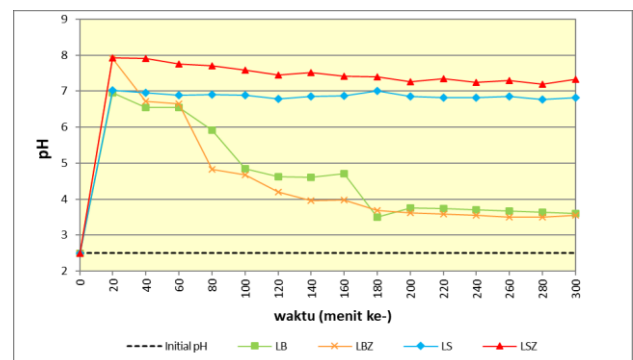
Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan terhadap tiga saluran kontrol zeolit maka didapatkan hasil pengukuran pH air keluaran yang ditampilkan pada Gambar 5. Ketiga saluran kontrol zeolit mampu meningkatkan pH awal AAT. Nilai pH cenderung meningkat pada awal pengujian dan turun bertahap hingga akhir pengujian. Saluran ZC menunjukkan kemampuan penetralan asam yang lebih tinggi dibandingkan dua saluran lainnya. Pada 20 menit pertama, pH mampu mencapai 6,18 dan terus turun hingga menit ke-300 di akhir pengujian pada pH 3,10. Hal ini membuktikan semakin luas permukaan adsorben, maka semakin besar pertukaran ion yang terjadi [20]. Saat berkontak dengan AAT, bukan hanya pertukaran ion logam yang terjadi tetapi juga ion hidrogen sehingga berpengaruh pada peningkatan pH [18, 9].

Selanjutnya berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada empat OLC, maka diperoleh hasil pengukuran pH air keluaran yang ditampilkan pada Gambar 6. Dua saluran menunjukkan performa yang baik dalam menetralkan AAT, yaitu saluran yang menggunakan *limestone* dengan ukuran butir kecil. Sementara dua saluran lainnya yang menggunakan *limestone* berukuran butir besar menunjukkan kemampuan penetralan asam yang kurang baik walau nilai pH masih berada di atas pH awal.



Gambar 5. Nilai pH hasil air keluaran pada simulasi kontrol zeolit

Penambahan zeolit pada OLC menunjukkan kemampuan penetralan yang lebih tinggi dibandingkan saluran yang tidak ditambahkan zeolit. Hal ini dikarenakan adanya bahan alkalin yang dilepaskan selama pertukaran ion saat AAT melewati zeolit di pangkal saluran [13]. Kemampuan penetralan asam tertinggi ditunjukkan oleh saluran LSZ yang berisikan *limestone* ukuran butir kecil dengan penambahan zeolit di pangkal saluran, yang mencapai pH tertinggi 7,92 di awal pengujian dan pH terendah 7,20 di akhir pengujian.

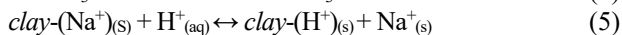
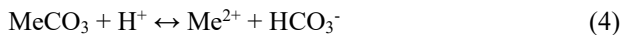


Gambar 6. Nilai pH hasil air keluaran pada simulasi OLC

Gambar 6 juga memperlihatkan semakin besar ukuran butir maka kemampuan penetralan AAT semakin berkurang [14]. Hal ini berhubungan dengan luas permukaan *limestone* yang akan bereaksi dengan air asam tambang. Semakin besar ukuran butir *limestone*, maka semakin kecil luas permukaan *limestone* dibandingkan dengan volumenya sehingga kurang reaktif untuk menetralkan AAT. Sebaliknya, semakin kecil ukuran butir *limestone* maka semakin besar luas permukaan yang dapat bereaksi menetralkan AAT [7]. Hal ini sesuai dengan data pada Tabel 5, yang mana luas permukaan *limestone* untuk ukuran besar dan kecil berturut-turut adalah 0,90 m² dan 1,54 m².

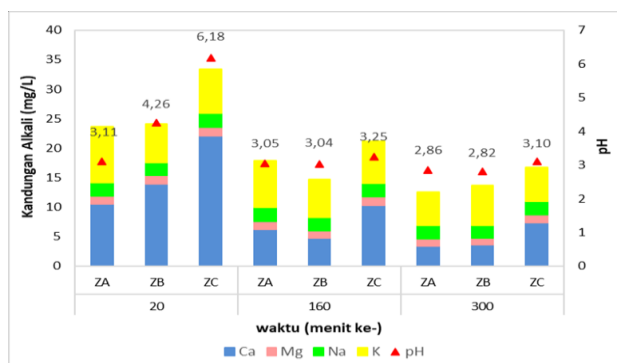
Pelepasan Alkali Terhadap Penetralkan AAT

Pengukuran konsentrasi alkali ini sangat penting karena bertanggung jawab terhadap penetralan AAT baik melalui pelarutan mineral karbonat pada Persamaan 4 ataupun pertukaran ion pada Persamaan 5 [18].



Pada persamaan 4, Me merupakan kation divalen seperti kalsium dan magnesium, tetapi bukan besi atau mangan karena kedua logam ini dapat melepaskan keasaman setelah terjadi hidrolisis atau presipitasi.

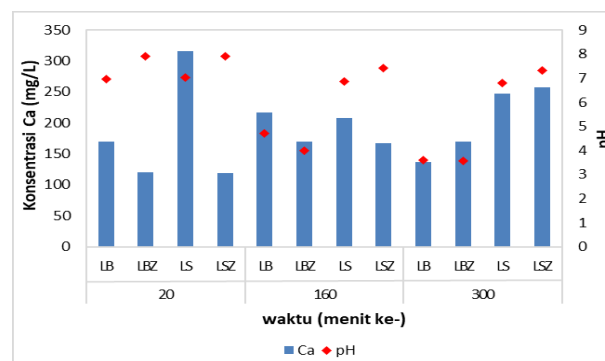
Gambar 7 menunjukkan jumlah konsentrasi alkali pada air hasil pengolahan simulasi kontrol zeolit. Konsentrasi alkali yang diplot pada grafik meliputi konsentrasi logam Kalium (K), Magnesium (Mg), Natrium (Na) dan Kalsium (Ca). Semua logam alkali tersebut berasal dari mekanisme pertukaran kation antara polutan yang terdapat pada AAT dengan kation yang dapat ditukar (*exchangeable cation*) pada zeolit. Hal tersebut disimpulkan demikian karena pada AAT buatan tidak mengandung logam alkali, melainkan hanya mengandung logam Fe, Mn, Al dan sulfat.



Gambar 7. Konsentrasi alkali pada air keluaran saluran kontrol zeolit

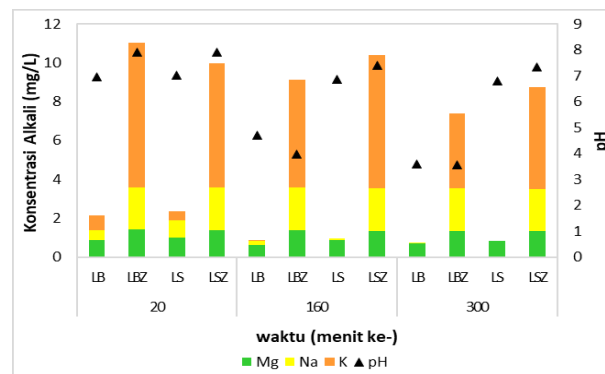
Berdasarkan grafik di atas, Ca dan K merupakan kation yang konsentrasinya paling tinggi dibandingkan konsentrasi alkali lainnya pada setiap air keluaran. Konsentrasi Ca berkisar antara 3,38 – 22,09 mg/L dan konsentrasi K berkisar antara 5,60 – 9,44 mg/L. Hal tersebut membuktikan bahwa kedua kation tersebut paling berperan dalam pertukaran ion antara adsorbat dan adsorben. Pelepasan logam alkali ke dalam larutan berbanding lurus dengan peningkatan pH AAT.

Pelepasan Kalsium (Ca) pada setiap OLC dapat dilihat pada Gambar 8. Konsentrasi Ca pada semua saluran bernilai tinggi yaitu di atas 100 mg/L. Hal ini dikarenakan terjadinya pelarutan mineral kalsit (CaCO_3) yang merupakan mineral utama pada *limestone*. Pada grafik dapat dilihat bahwa nilai konsentrasi Ca pada saluran yang hanya berisikan *limestone* lebih tinggi dibandingkan saluran yang ditambahkan zeolit. Hal ini dikarenakan keasaman total AAT yang mengkonsumsi kalsit telah jauh berkurang setelah melewati zeolit di pangkal saluran. Keasaman total tersebut dipengaruhi oleh pH dan konsentrasi Fe, Mn dan Al [18].

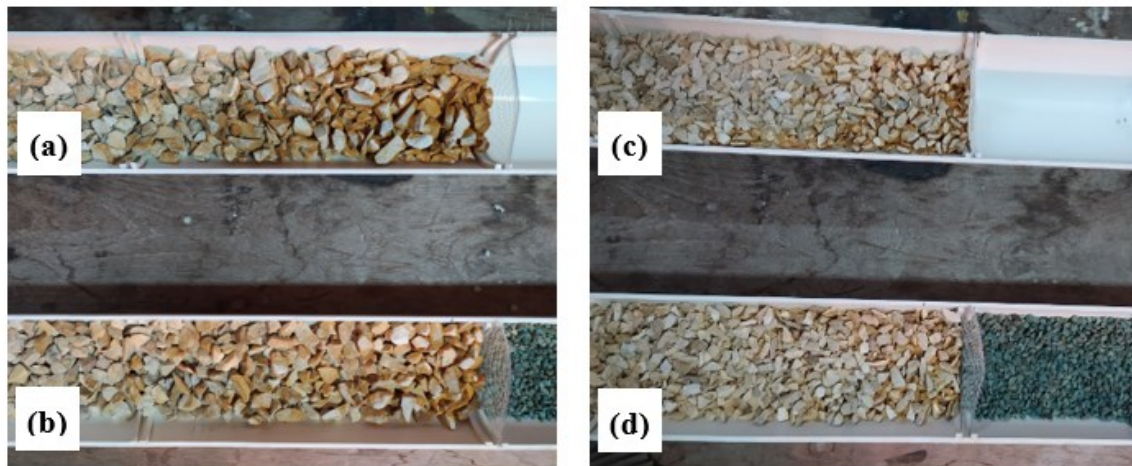


Gambar 8. Konsentrasi alkali utama (Ca) pada air keluaran OLC

Kondisi tersebut berbanding terbalik dengan nilai pelepasan logam alkali lainnya yaitu Magnesium (Mg), Natrium (Na), dan Kalium (K) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Nilai konsentrasi alkali tersebut jauh lebih tinggi di semua saluran yang ditambahkan zeolit. Hal tersebut dikarenakan mekanisme pertukaran kation yang terjadi antara kation terlarut pada air asam tambang dengan permukaan zeolit yang melepaskan logam alkali (Ca, Mg, Na dan K) sebagai *exchangeable cations*.



Gambar 9. Konsentrasi alkali lain (Mg, Na, K) pada air keluaran OLC



Gambar 10. Kondisi *armoring* pada *limestone* di akhir simulasi (a) LB (b) LBZ (c) LS (d) LSZ

Pengamatan *Armoring Limestone*

Pada akhir pengolahan menggunakan OLC selama 300 menit, terlihat secara visual perbandingan *armoring* yang terjadi pada *limestone* di setiap saluran seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10. Terlihat bahwa *armoring* oksida besi yang ditandai dengan endapan berwarna kuning kecoklatan yang menempel pada permukaan *limestone* ditemukan lebih banyak pada saluran yang hanya berisikan *limestone*. Endapan oksida besi inilah yang mempengaruhi penurunan kemampuan penetralan dalam sistem [7]. Saluran yang ditambahkan zeolit pada bagian awal cenderung memiliki lapisan *armoring* yang lebih sedikit pada permukaan *limestone* dikarenakan sebagian logam terlarut pada AAT telah mengalami pertukaran ion saat melewati lapisan zeolit (*zeolite bed*).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, zeolit terbukti memiliki kemampuan penetralan asam dan mampu mengurangi pembentukan presipitat pada permukaan *limestone*. Kemampuan tersebut dipengaruhi oleh kemampuan tukar ion dan luas permukaan zeolit sebagai media pertukaran ion. Hal tersebut terlihat pada saluran ZC dengan jumlah massa zeolit terbanyak di antara saluran kontrol zeolit yang menunjukkan efisiensi tertinggi dengan nilai pH 6,8 di awal pengujian. Ketika zeolit ditambahkan pada pangkal OLC, maka kemampuan penetralan asam juga turut meningkat. Saluran terefektif dari model OLC yang dikaji adalah saluran LSZ yang berisikan *limestone* berukuran kecil dengan penambahan zeolit di pangkal saluran, yang mampu mencapai pH tertinggi sebesar 7,92 di awal pengujian dan 7,20 di akhir pengujian. Hal ini dikarenakan *limestone* berukuran kecil pada saluran LSZ memiliki luas permukaan yang lebih besar untuk bereaksi dengan AAT. Selain itu, keberadaan zeolit di pangkal saluran membantu mengurangi pembentukan *armoring* pada permukaan *limestone* dan menjaga keberlangsungan penetralan dalam sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Faulkner, B.B., Skousen, J.G. (1994). Treatment of Acid Mine Drainage by Passive Treatment Systems, in *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference*, 2, 250-257.
- [2] Acharya, B.S., Kharel, G. (2020). Acid mine drainage from coal mining in the United States, *Journal of Hydrology*, 588.
- [3] Hallberg, K.B., Johnson, D.B. (2005). Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine, *Science of the Total Environment*, 338, 53-66.
- [4] Bernier, L., Aubertin, M., Bienvenu, L., Cyr, J. (2020). Limestone Drain Design Criteria in AMD Passive Treatment: Theory, Practice and Hydrogeochemistry Monitoring at Lorraine Mine Site, Temiscamingue.
- [5] Taylor, J. dan Waters J. (2003). Treating ARD – how, when, where and why. *Mining Environ. Manage* 11, 6-9.
- [6] Skousen, J.G., Ziemkiewicz, P.F., McDonald, L.M. (2019). Acid mine drainage formation, control and treatment. *Approaches and strategies. Extract. Ind. Soc*, 6 (1), 241-249.
- [7] Santomartino, S., Webb, J.A. (2007). Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron. Department of Earth Sciences, La Trobe University, Victoria 3086, Australia. *Applied Geochemistry* 22, 2344-2361.
- [8] Robbins, E.I., Cravotta, C.A., Savelle, C.E., Nord Jr., G.L. (1999). Hydrobiogeochemical Interactions in 'anoxic' limestone drains for neutralisation of acidic mine drainage. *Fuel* 78, 259-270.
- [9] Pitcher, S.K., Slade, R.C.T. and Ward, N.I. (2004). Heavy metal removal from motorway



- stormwater using zeolites. *Science of the Total Environment*, 334– 335, 161–166.
- [10] Rismiarti, Z., Yuniarti, Y., Alfanaar, R. (2016). Penerapan Metode Sonikasi terhadap Adsorpsi Fe(III) pada Zeolit Alam Teraktivasi. *Journal of Chemistry*, 5:2, 63-68.
- [11] Emelda, L., Putri., S.M. dan Ginting, S. (2013). Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi untuk Adsorpsi Logam Krom (Cr). *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 9(4): 166–172.
- [12] Motsi, T. (2010). Remediation of acid mine drainage using natural zeolite. School of Chemical Engineering The University of Birmingham United Kingdom.
- [13] Silva, D., Weber, C., Oliveira, C. (2021). Neutralization and uptake of pollutant cations from Acid Mine Drainage (AMD) using limestones and zeolites in a pilot-scale passive treatment system. *Minerals Engineering* 170, 107000.
- [14] Brahaita, L.D., Pop, L.C., Baciuc, C., Mihaiescu, R., Modoi, C., Popita, G., Truta. R.M. (2017). The Efficiency of Limestone in Neutralizing Acid Mine Drainage - A Laboratory Study.
- [15] Nurfasiha, Kusuma, G.J. (2020). Simulasi pengolahan air asam tambang menggunakan open limestone channel skala laboratorium, *Jurnal Geomine vol 8*, 32-43.
- [16] GARD (2014). Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention.
- [17] Margeta, K., Logar, N.Z., Siljeg, M., Farkas, A. (2013). Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use. <http://dx.doi.org/10.5772/50738>.
- [18] Gautama, R.S. (2014). Pembentukan, Pengendalian dan Pengelolaan: Air Asam Tambang, Institut Teknologi Bandung.
- [19] AMIRA International. (2002). ARD Test Handbook, Ian Wark Research Institute, New Zealand.
- [20] Widayatno, T., Yuliawati, T., Agung A.S. (2017). Adsorpsi Logam Berat (Pb) dari Limbah Cair dengan Adsorben Arang Bambu Aktif. *Jurnal Teknologi Bahan Alam*, 1(1).