

OVERVIEW PERBANDINGAN METODE OPEN LIMESTONE DRAIN DAN ANOXIC LIMESTONE DRAIN DALAM PENGOLAHAN AIR ASAM TAMBANG

COMPARATIVE OVERVIEW OF OPEN LIMESTONE DRAIN AND ANOXIC LIMESTONE DRAIN METHODS IN ACID MINE DRAINAGE TREATMENT

Nandita Suri Kallo¹, Shulha Muzakir¹, Dyah Tjahyandari Suryaningtyas²

1. Institut Teknologi Bandung, Indonesia
2. Institut Pertanian Bogor, Indonesia

Email: nanditasuri21@gmail.com

ABSTRAK

Kegiatan pertambangan memiliki beberapa dampak buruk terhadap lingkungan, salah satunya adalah munculnya Air Asam Tambang (AAT). Air asam tambang memiliki nilai pH yang rendah serta kandungan logam-logam terlarut yang tinggi. Oleh sebab itu, air asam tambang harus diolah terlebih dahulu sebelum dikeluarkan ke lingkungan. Pengolahan air asam tambang dapat digunakan dengan dua cara, yaitu *active treatment* dan *passive treatment*. *Passive treatment* merupakan metode pengolahan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan *active treatment*. Pada pengolahan *passive treatment* terdapat metode-metode yang menggunakan material alkalin, dua diantaranya adalah metode *Open Limestone Drain* (OLD) dan *Anoxic Limestone Drain* (ALD). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan tingkat keefektifan dari kedua metode tersebut. Penelitian dilakukan dengan metode *literature review* dengan cara mengumpulkan dan menganalisis hasil penelitian yang telah dilakukan dan telah diterbitkan sebelumnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *open limestone drain* memiliki kemampuan penetralan dan pengurangan kandungan logam-logam terlarut yang lebih baik dibanding sistem *anoxic limestone drain*, namun memiliki *dissolution rate limestone* yang lebih rendah. sistem *open limestone drain* juga menunjukkan keefektifan yang lebih baik dari sistem *anoxic limestone drain* dalam pengolahan air asam tambang.

Kata kunci: Air Asam Tambang, Anoxic Limestone Drain, Open Limestone Drain, Passive Treatment.

DOI: 10.15408/jipl.v4i1.36150

ABSTRACT

Mining activities have negative impacts on the environment, one of which is Acid Mine Drainage (AMD). Acid mine drainage has a low pH value and a high content of dissolved metals. As a result, acid mine drainage must be treated before being discharged into the environment. There are two methods for treating acid mine drainage: active treatment and passive treatment. Passive treatment is a method that is more environmentally friendly than active treatment. There are methods that use alkaline materials in passive treatment, two of them are the Open Limestone Drain (OLD) and Anoxic Limestone Drain (ALD) methods. The purpose of this study is to evaluate the two approaches' relative efficacy. The literature review approach was used to collect and analyze the results from previous studies. The result of this research shows that open limestone drain has a lower dissolution rate of limestone than anoxic limestone drain. Nonetheless, the open limestone drain system has better neutralization and reduction capacity for dissolved metals. The open limestone drain system also showed better effectiveness than the anoxic limestone drain system in treating acid mine drainage.

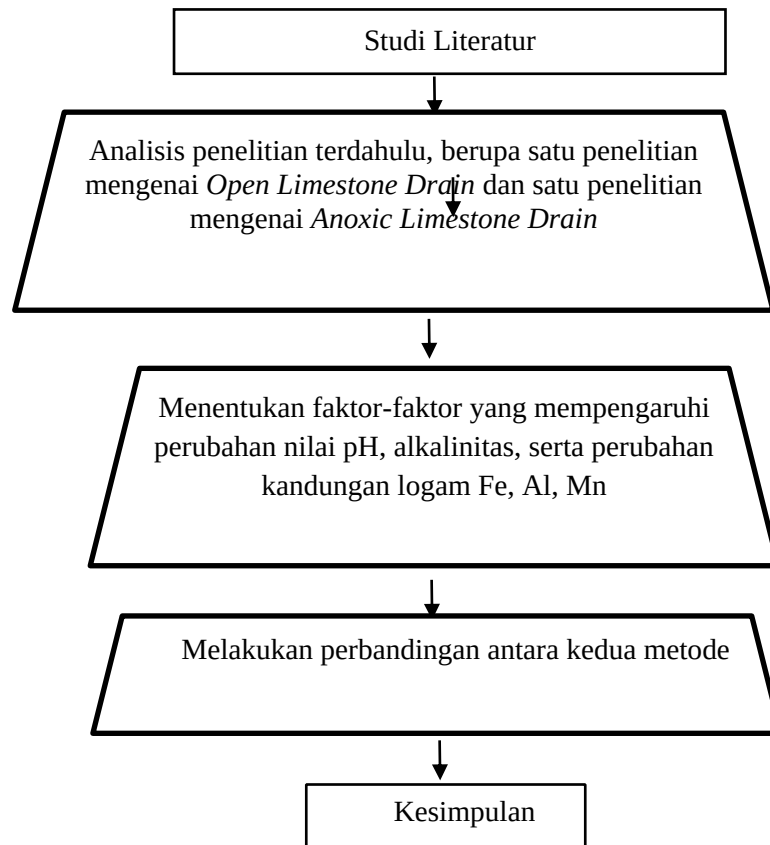
Keywords: Acid Mine Drainage, Anoxic Limestone Drain, Open Limestone Drain, Passive Treatment.

PENDAHULUAN

Pertambangan merupakan kegiatan untuk memanfaatkan sumberdaya mineral dan batubara (bahan tambang), sehingga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Kegiatan penambangan memiliki beberapa dampak buruk terhadap lingkungan, salah satunya adalah munculnya Air Asam Tambang (AAT). AAT merupakan air yang terbentuk dari mineral sulfida yang tersingkap karena adanya penggalian atau penimbunan batuan penutup. (Freeze & Cherry, 1979). Mineral sulfida yang teroksidasi oleh oksigen membentuk produk-produk hasil oksidasi yang terlindas oleh air, sehingga terjadinya peningkatan keasaman pada badan air penerima. AAT memiliki nilai pH yang relatif rendah dan umumnya mengandung logam Fe, Al, Mn, serta logam lainnya (Bigham, 1996 ; Hem, 1978). AAT akan memberi dampak buruk bagi lingkungan. Oleh sebab itu, sebelum dikeluarkan ke lingkungan, perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Tujuan pengolahan AAT adalah untuk mengolah air agar memiliki kualitas yang sesuai dengan pemanfaatannya kembali dan memenuhi standar baku mutu, serta tidak berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Pengolahan air asam tambang secara umum terbagi menjadi tiga metode, yaitu *active treatment*, *passive treatment* dan *in-situ treatment* (Brady, 1997 ; Cravotta, 2003). *Active treatment* dan *in situ treatment* memiliki kesamaan yaitu sama-sama mencampurkan bahan kimia alkalin (Turner & McCoy, 1990) secara aktif (membutuhkan pengoperasian dan perawatan dari manusia secara kontinyu) untuk menetralkan AAT (Brant, & Ziemkiewicz, 1997). Perbedaanannya, pengolahan *in situ* adalah dengan menginjeksi *slurry* kapur secara langsung ke sumber terbentuknya AAT (Ferris et al, 1989), seperti timbunan batuan penutup, *pit lake*, dan *mine waste*. Pengolahan lain AAT adalah dengan *passive treatment* atau pengolahan pasif. (Rose & Ghazi, 1997) Pengolahan AAT secara pasif adalah proses pengolahan yang tidak membutuhkan intervensi manusia secara reguler dalam pengoperasian dan perawatannya. Sasaran dari sistem ini adalah mengupayakan agar proses pengurangan kandungan kontaminan yang berlangsung secara alami dapat dioptimalkan di dalam sistem pengolahan dan tidak di dalam badan air penerima (Gautama, 2019; Nordstrom, & Alpers, 1999) Salah satu metode dalam pengolahan pasif adalah *Open Limestone Drain* (OLD) dan *Anoxic Limestone Drain* (ALD), dimana pada penelitian ini akan dibahas lebih lanjut mengenai perbedaan metode ALD dan OLD dengan cara melakukan kajian hasil dari studi literatur sehingga nantinya diperoleh sebuah komparasi kelebihan dan kekurangan kedua metode tersebut.

METODE

Penelitian dilakukan dengan metode *literature review*. *Literature review* digunakan sebagai suatu penilaian terhadap kualitas dari sebuah karya tulis ilmiah, yang terdiri dari uraian tentang teori, temuan, dan bahan penelitian lain yang diperoleh dari bahan acuan untuk dijadikan landasan kegiatan penelitian. Pada penelitian ini, literatur yang digunakan berasal dari dua jurnal internasional yang masing-masing berisikan mengenai pengolahan AAT *Passive Treatment* dengan metode *Open Limestone Drain* dan *Anoxic Limestone Drain*. Selanjutnya, dilakukan analisis dengan cara membandingkan dua metode tersebut untuk mengetahui keefektifan diantara keduanya. Adapun parameter yang dibandingkan adalah nilai pH, konsentrasi alkalinitas, serta kandungan logam yaitu Fe, Al dan Mn serta kandungan *trace metal* lainnya yang dapat ditemukan dalam AAT (McKenzie, 1980). Sumber literatur dari penelitian ini adalah dari dua artikel ilmiah. Artikel pertama oleh Cravotta dan Trahan yang diterbitkan tahun 1999 dengan judul “*Limestone drain to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage*” (Cravotta & Trahan, 1999) dan artikel kedua oleh Cravotta yang diterbitkan tahun 2003 dengan judul “*Size and performance of anoxic limestone drains to neutralize pH*” (Cravotta, 2003). Diagram Alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

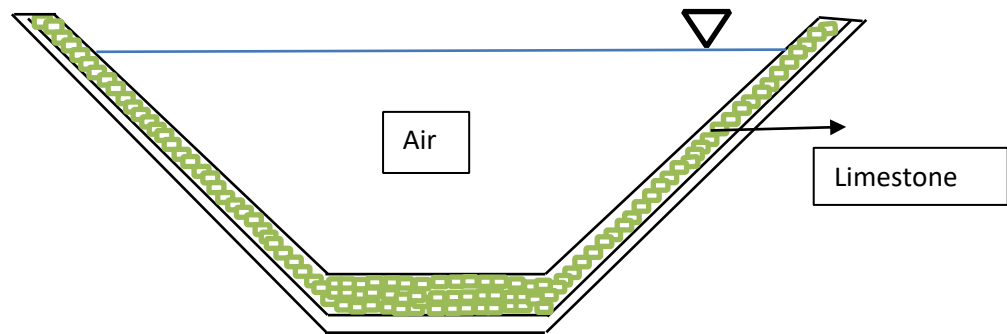
Prinsip dari pengolahan pasif yaitu mengalirkan AAT pada suatu fasilitas penetral buatan manusia, yang memanfaatkan proses fisik, kimia dan/atau biologi dari fasilitas tersebut untuk menetralkan AAT (Nugraha, 2019). Jika dibandingkan dengan *active treatment* dan *in situ treatment* yang *high energy consumption* dan *high maintenance*, pengolahan pasif lebih efisien dalam penggunaan energi serta ramah lingkungan (Yang, 2023). Penggunaan material alkalin dalam *passive treatment* terdapat beberapa metode dua diantaranya adalah *Open Limestone Drain* (OLD) dan *Anoxic Limestone Drain* (ALD).

Open Limestone Drain (OLD)

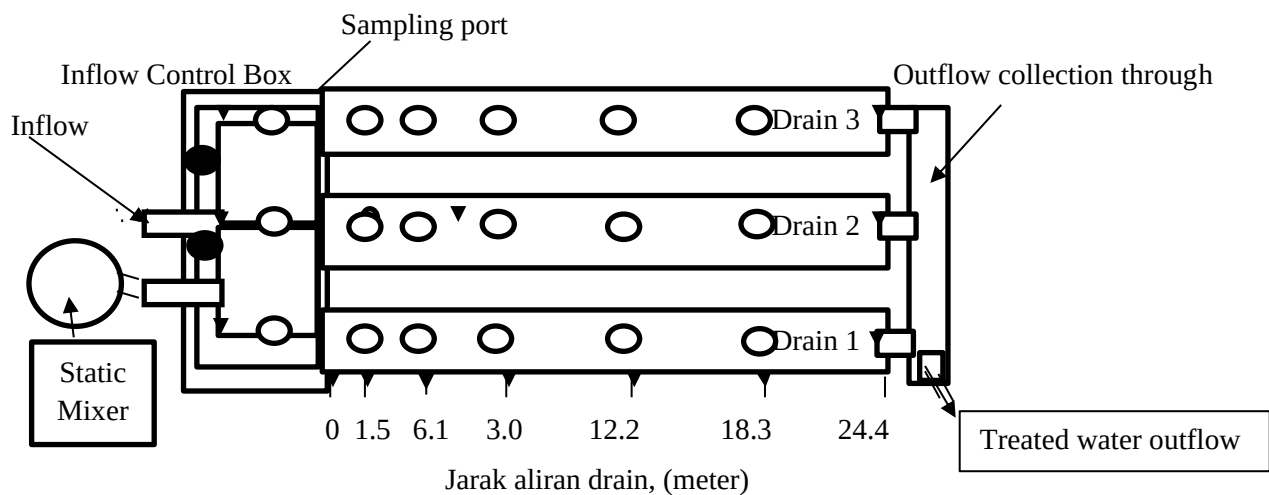
Open Limestone Drain (OLD) adalah saluran yang dibuat untuk menambah alkalinitas melalui pelarutan *limestone* yang berada di dasar dan dinding dari saluran (Hill & Wilmoth, 1971). Saluran ini terbuka, sehingga akan terjadi kontak dengan oksigen di atmosfer yang menyebabkan oksidasi logam-logam yang akan membentuk endapan hidroksida. Endapan hidroksida ini akan melapisi permukaan *limestone* yang akan berpengaruh terhadap kinerja sistem ini (Gautama, 2019). Model dari pengolahan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Keberhasilan dari penggunaan sistem ini telah banyak diteliti sebelumnya, salahnya satunya penelitian oleh Cravotta dan Trahan pada tahun 1999 dengan judul “*Limestone Drains to Increase pH and Remove Dissolved Metals from Acidic Mine Drainage*”. Penelitian ini dilakukan karena menurut mereka proses-proses dan fungsi dari *open limestone drainage* yang terjadi di lapangan belum pernah dievaluasi sebelumnya. Hal ini memberi tujuan dalam penelitian mereka yaitu untuk menginvestigasi proses hidrogeokimia dari sistem OLD yang telah diaplikasikan di lapangan. Objek dari penelitian tersebut adalah tiga percobaan sistem OLD yang telah di bangun pada tahun 1995 oleh US Geological Survey sebagai sistem penetral AAT dari bekas tambang batubara di Pennsylvania, Amerika Serikat. Sistem ini

dibangun sepanjang 24,4 meter, dengan titik *sampling* terbagi menjadi 7 titik. Titik pertama adalah *influent*, titik kedua dengan jarak 1,5 m, titik ketiga dengan jarak 3 m, titik keempat dengan jarak 6,1 m, titik kelima dengan jarak 12,2 m, titik keenam dengan jarak 18,3 m dan titik ketujuh dengan jarak 24,4 m atau sebagai titik *effluent*. *Water flow rate* dari sistem ini adalah 6.5 L/menit (Cravotta and Trahan, 1999). Desain dari tiga sistem percobaan OLD pada penelitian Cravotta & Trahan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Open Limestone Drainage (OLD) diadaptasi dari (Gautama, 2019).

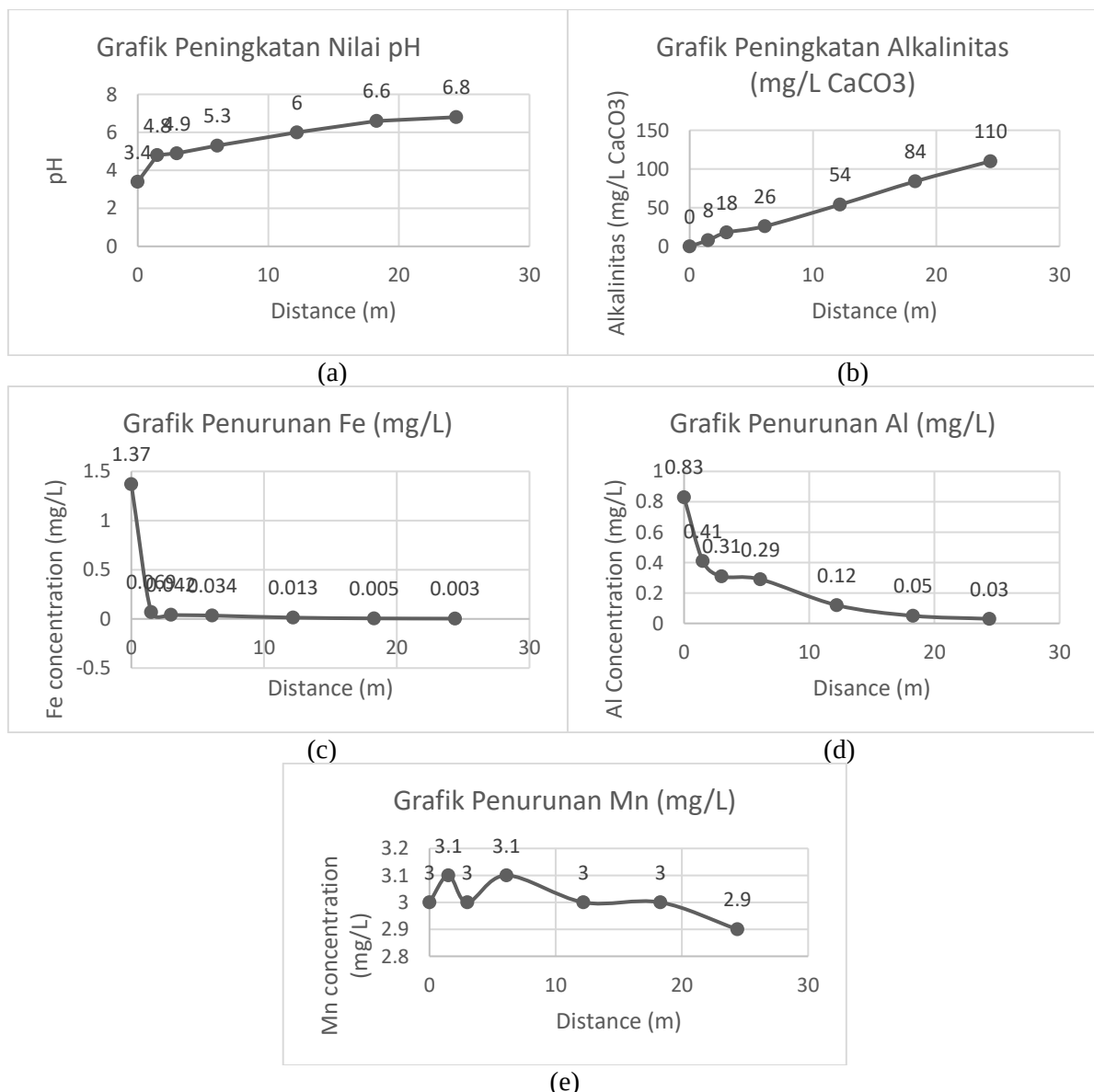


Gambar 3. Desain Aliran OLD diadaptasi dari (Cravotta and Trahan, 1999)

Penelitian dilakukan selama satu tahun, yaitu dari Maret 1995 sampai Maret 1996. Pengamatan yang dilakukan selama proses penelitian dapat diketahui bahwa telah terjadi kenaikan nilai pH serta alkalinitas sebagai hasil dari penetralan oleh *limestone* yang terdapat pada sistem OLD. Kenaikan nilai pH ini menyebabkan terjadinya reaksi oksidasi dari Fe dan Al^{3+} hingga terbentuk endapan Fe-hidroksida dan Al-hidroksida yang melapisi permukaan batuan, kayu dan pipa yang bersentuhan dengan AAT. Endapan-endapan ini diidentifikasi sebagai amorf $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ferrihidrit, schwertmannite atau geotit dan amorf $\text{Al}(\text{OH})_3$ atau gibbsit dengan kristal tak beraturan (Cravotta and Trahan 1999 ; Lasaga, 1981) Reaksi oksidasi dari Fe dan Al^{3+} ini juga menyebabkan konsentrasi Fe dan Al terlarut dalam AAT berkurang Tabel 1 dan Gambar 4. Cravotta dan Trahan berhipotesis bahwa walaupun endapan-endapan tersebut melapisi permukaan *limestone* dari sistem OLD, tidak akan terjadi penghambatan kelarutan dari *limestone* karena endapan yang terbentuk akan mengalami proses transportasi dalam bentuk padatan (*suspended particles*) ketika air yang mengalir melalui sistem OLD memiliki kecepatan aliran yang tinggi.

Tabel 1. pH, Alkalinitas, kandungan logam Fe, Al, Mn pada Sistem OLD dari penelitian Cravotta dkk

Distance (meter)	0	1.5	3	6.1	12.2	18.3	24.4	Perubahan (%)
Ph	3.4	4.8	4.9	5.3	6	6.6	6.8	50
Alkalinity (mg/L)	0	8	18	26	54	84	110	100
Fe (mg/L)	1.37	0.069	0.042	0.034	0.013	0.005	0.003	99.78
Al (mg/L)	0.83	0.41	0.31	0.29	0.12	0.05	0.03	96.38
Mn (mg/L)	3	3.1	3	3.1	3	3	2.9	3.3

**Gambar 4.** Grafik Peningkatan Nilai pH (a) dan Alkalinitas (b), serta Penurunan Kandungan Fe (c), Al (d), dan Mn (e) pada sistem OLD dari penelitian (Cravotta & Trahan 1999).

Endapan dari proses oksidasi Fe ini, memicu terjadi proses adsorpsi ion Mn hingga terbentuk endapan Mn-Oksida. Proses selanjutnya adalah proses *co-precipitation* dari ion-ion logam lainnya seperti Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} dan Ni^{2+} Tabel 2. Proses adsorpsi dan *co-precipitation* ini juga menghasilkan pengurangan kandungan logam terlarut dalam AAT. Proses pengolahan yang dilakukan selama setahun dari penelitian Cravotta dan Trahan, menunjukkan bahwa sistem OLD menghasilkan *effluent* dengan pH

netral, kandungan alkalinitas tinggi dan *acidity* yang menurun serta terjadi pengurangan kandungan logam-logam terlarut dengan waktu tinggal yang relatif cepat yaitu 1 jam–3 jam waktu tinggal. Cravotta dan Trahan juga menemukan bahwa, lapisan endapan oksida yang menutupi permukaan *limestone* tidak akan menghambat kelarutan *limestone* asal sistemnya memiliki kecepatan aliran yang cepat (Cravotta & Trahan, 1999). (Powell, 1988) Hal ini sejalan dengan kesimpulan dari (Ziemkiewicz et al, 1997) yang menyatakan bahwa OLD akan bekerja secara optimal dengan kemiringan *slope* >20% dan kecepatan aliran yang membuat endapan oksida tetap dalam bentuk *suspended particle*.

Tabel 2. Konsentrasi Kandungan Logam dari sistem OLD dari penelitian Cravotta dan Trahan (Cravotta & Trahan, 1999)

Logam	Konsentrasi (µg/mg)	
	Awal	Akhir
Zn	0.35	0.16
Cu	0.21	0.15
Pb	0.19	< 0,46
Ni	0.13	< 0,46

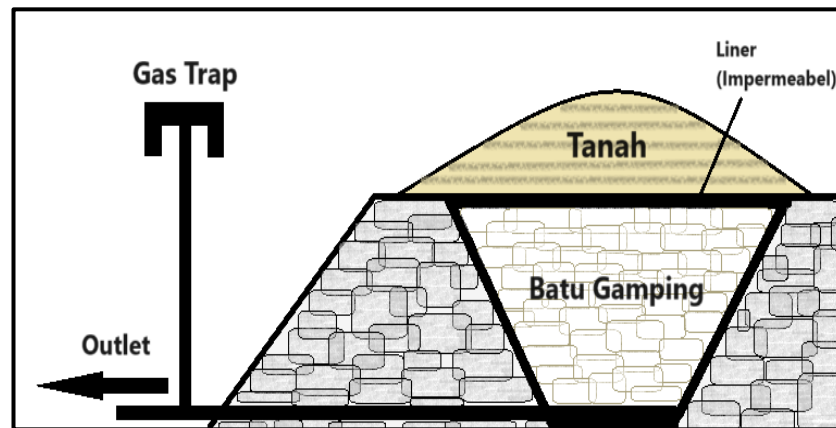
Anoxic Limestone Drain (ALD)

Anoxic Limestone Drain (ALD) merupakan metode pengolahan pasif AAT yang menggunakan sel atau saluran *limestone* dengan penudung guna meminimalkan kontak dengan oksigen yang terdapat di atmosfer serta memaksimalkan akumulasi CO₂. Lapisan penudung yang umum adalah lempung setebal 1-3 m. Pada metode pengolahan ini, *limestone* larut di dalam AAT dan meningkatkan pH serta alkalinitas. Pada kondisi *anoxic* tidak akan terjadi pelapisan *limestone* oleh ferihidroksida karena Fe²⁺ tidak akan mengalami presipitasi pada kondisi pH disekitar netral. *Limestone* dengan CaCO₃ yang tinggi (>80%) akan lebih cepat melarut daripada *limestone* yang mengandung MgCO₃ atau CaMg(CO₃)₂ yang tinggi. *Limestone* yang baik untuk sistem ini adalah yang mengandung CaCO₃ antara 80-95% dan berukuran 5-20 cm (Gautama, 2019).

Keberhasilan metode ini bergantung pada beberapa hal seperti:

- Besi dalam bentuk ferro (Fe II), karena jika dalam bentuk ferri (Fe III) *limestone* akan terlapisi
- Kandungan oksigen jangan sampai bebas, agar tidak memicu presipitasi besi ferri (Fe III).
- Konsentrasi Al yang rendah (kurang dari 2 mg/L), karena presipitasi alumunium hidroksida akan menyumbat lapisan *limestone*.
- Memungkinkan pelapisan CO₂ yang terbentuk.

Salah satu penelitian dengan menggunakan metode ini adalah penelitian berjudul “*Size and Performance of Anoxic Limestone Drains to Neutralize Acidic Mine Drainage*” oleh Charles A. Cravotta pada tahun 2003 (Cravotta, 2003). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja pengolahan AAT dengan menggunakan metode ALD. Objek dari penelitian ini adalah suatu sistem pasif dengan menggunakan *limestone*, dimana terjadinya keterlibatan evaluasi kinerja dari sistem tersebut. Penelitian ini memperkenalkan metode untuk memprediksi alkalinitas yang dihasilkan dalam sistem ALD dan memperkirakan massa *limestone* yang diperlukan berdasarkan data dari pengujian wadah tertutup (*cubitainer*) jangka pendek. Uji *cubitainer*, yang menggunakan massa awal 4 kg batu kapur yang dihancurkan dan dialiri dengan 2,8 L AAT, dilakukan selama 11 hingga 16 hari dan memberikan perkiraan alkalinitas awal dan maksimum serta laju produksi alkalinitas dan pelarutan *limestone*. Penelitian ini menggunakan data dari 10 tahun di Howe Bridge, 11 tahun di Morrison, dan 5 tahun di Buck Mountain (Cravotta, 2003).



Gambar 5. Anoxic Limestone Drain (ALD) adaptasi dari (Gautama, 2019).

Tabel 3. Perubahan Nilai pH dan Alkalinitas dalam Sistem ALD dari hasil Penelitian (Cravotta, 2003)

ALD	Flow Rate (L/min)	pH			Alkalinity (As CaCO ₃)		
		Influent	Effluent	Perubahan (%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Perubahan (%)
Howe Bridge	117	5.8	6.3	8.62	36	158	338.89
Morrison	7	5.3	6.4	20.75	30	291	870.00
Buck Mountain	460	4.9	6.4	30.61	2	82	4000.00
Average			6.36	20.00			1736.30

Tabel 4. Perubahan Kandungan Logam Fe, Al, dan Mn di Sistem ALD dari hasil Penelitian (Cravotta, 2003)

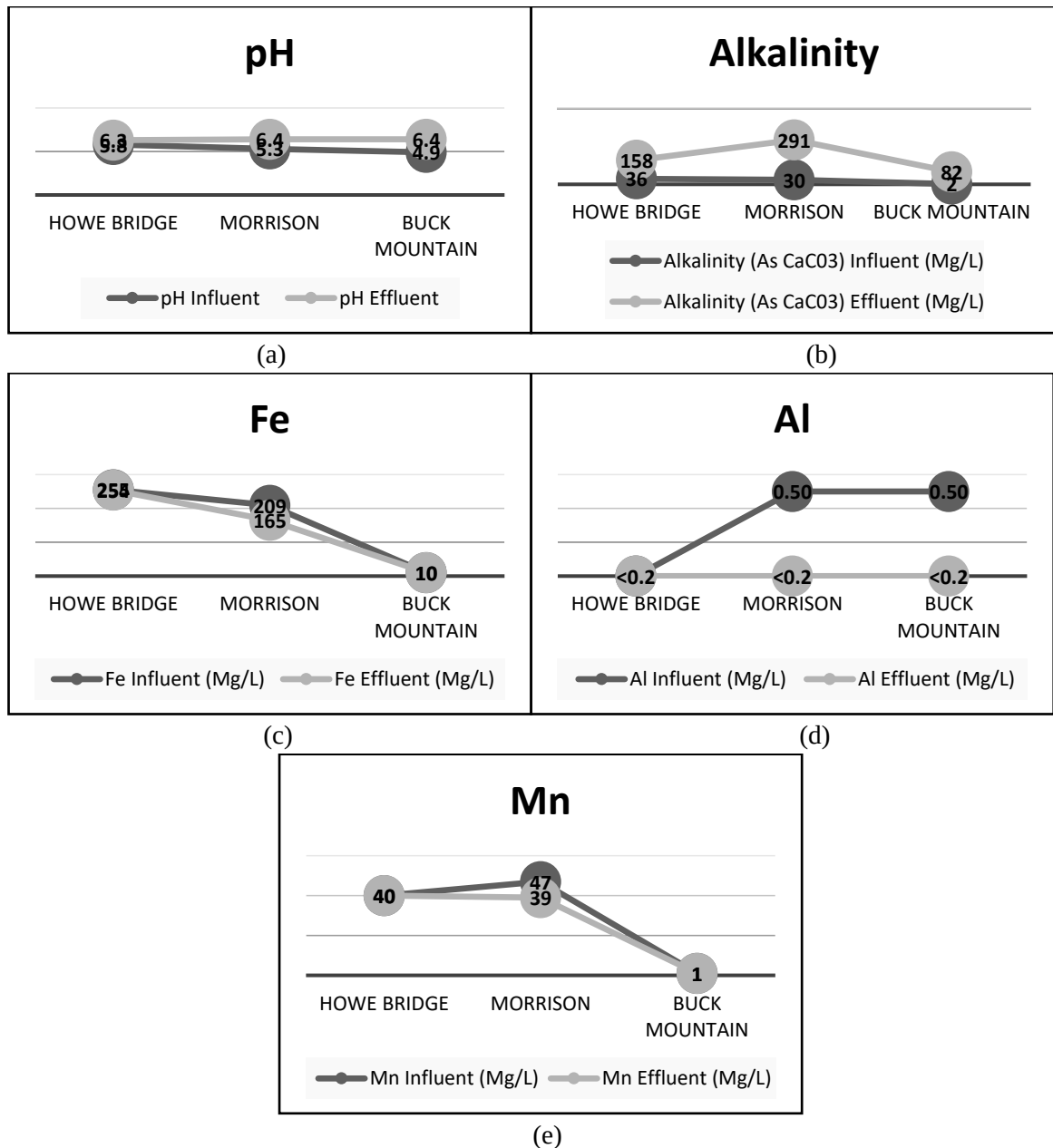
ALD	Fe			Al			Mn		
	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Perubahan (%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Perubahan (%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Perubahan (%)
Howe Bridge	255	254	0.39	<0.2	<0.2	0	40	40	0.00
Morrison	209	165	21.05	0.50	<0.2	>62	47	39	17.02
Buck Mountain	10	10	0.00	0.50	<0.2	>62	1	1	0.00
Average			7.15			>41.33			5.67

Dapat dilihat dari data yang diperoleh Tabel 3 dan Tabel 4, pada aliran *influent*, pH dan alkalinitas relatif rendah, sedangkan pada aliran *effluent* terjadinya kenaikan pH dan alkalinitas. Selain itu, kandungan logam seperti Al, Fe, dan Mn berkurang, ditandai dengan jumlah kandungan logam pada aliran *influent* relatif lebih tinggi dibandingkan dengan aliran *effluent*. Hal tersebut menandakan setelah dilakukan pengolahan AAT dengan metode ALD, dapat meningkatkan nilai pH dan Alkalinitas, serta menurunkan kandungan logam seperti Fe, Al dan Mn.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Cravotta, yang mempengaruhi terjadinya kenaikan nilai pH dan alkalinitas adalah waktu retensi dan jarak aliran turun pada sistem ALD, serta pelarutan *limestone* yang relatif cepat di dekat aliran *influent* dan terjadinya penurunan laju pelarutan saat mendekati kesetimbangan dengan kalsit (Cravotta, 2003).

Sedangkan kandungan logam seperti Fe, Al, dan Mn yang menurun diakibatkan oleh produksi alkalinitas yang signifikan di dalam ALD. Kandungan Fe, Al, dan Mn dapat menurun karena pelarutan *limestone* yang cepat di dekat aliran masuk dan penurunan laju pelarutan saat larutan mendekati kesetimbangan dengan kalsit. Meskipun terjadi produksi alkalinitas yang signifikan di ketiga ALD, air buangan dari

masing-masing ALD masih di bawah kejenuhan terhadap kalsit, yang dapat mengurangi konsentrasi logam-logam tersebut dalam air buangan.



Gambar 6. Kondisi perbandingan aliran *Influent* dan *Effluent* sistem ALD untuk nilai pH (a), Alkalinitas (b), Fe (c), Al (d), dan Mn (e) pada Howe Bridge, Morrison, dan Buck Mountain dari hasil penelitian (Cravotta, 2003)

Perbandingan Metode *Open Limestone Drain* (OLD) dan *Anoxic Limestone Drain* (ALD)

Berdasarkan studi literatur yang dilakukan, sistem OLD dan ALD memiliki kemampuan yang sama dalam menaikkan nilai pH dan alkalinitas, namun dengan tingkat keefektifan yang berbeda. Kondisi *influent* sistem OLD memiliki tingkat keasaman yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem ALD Tabel 1 dan Tabel 3, dimana dapat dilihat dari persentase kenaikan pH pada sistem OLD mencapai 50% dalam kurun waktu hanya satu tahun, sedangkan ALD hanya mampu menaikkan maksimal 30.61% dalam kurun waktu 5 tahun (Wood, 1996).

Konsentrasi alkalinitas dari sistem OLD diketahui lebih rendah dibanding sistem ALD, ini terjadi karena kondisi sistem ALD yang tertutup dari atmosfer menghindarkan pengendapan Fe^{3+} dipermukaan *limestone* dan menghasilkan tekanan CO_2 yang tinggi yang dapat mempercepat dissolution rate dari

limestone (Hedin et al, 1994). Hasil *metal removal rate* menunjukkan perbedaan diantara kedua sistem dalam mengurangi kandungan logam-logam yang terlarut. Kandungan logam Fe, Al dan Mn untuk sistem OLD mengalami penurunan yang cukup drastis dibandingkan dengan sistem ALD Tabel 1 dan Tabel 4. Bahkan, pada sistem OLD juga terjadi penurunan kandungan logam terlarut lainnya seperti Zn, Cu, Pb dan Ni Tabel 2 sedangkan pada sistem ALD tidak terjadi penurunan logam-logam terlarut tersebut. Penurunan kandungan logam oleh sistem OLD ini terjadi dikarenakan terjadinya proses oksidasi dan hidrolisis logam secara bersamaan pada sistem tersebut. Proses oksidasi dari Fe dan Al, menghasilkan endapakan Fe-hidroksida dan Al-hidroksida yang kemudian menjadi adsorbent untuk logam-logam lainnya (*co-precipitation*). Proses oksidasi dari logam Fe dan Al ini yang menghasilkan endapan logam ini akan menutupi permukaan *limestone* sehingga dapat menurunkan kemampuan sistem OLD dalam mengolah AAT (Gautama, 2019). Namun, *flow rate* yang dimiliki sistem OLD relatif cepat yaitu 6.5 L/menit dibanding ALD Tabel 3 yang menyebabkan endapan-endapan tersebut terkikis dan terbawa sebagai bahan tersuspensi dalam sistem sehingga sistem OLD tetap efektif dalam mengolah AAT (Ziemkiewicz et al, 1997). Penjelasan tersebut menunjukan bahwa sistem OLD lebih efektif dibanding sistem ALD, sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Yang et al, 2023).

Tabel 5. Perbandingan Persentase Nilai pH, Alkalinitas, serta Kandungan Logam Fe, Al, Mn pada Sistem OLD dengan ALD

Parameter	Sistem OLD	Sistem ALD		
		Howe Bridge	Morrison	Buck Mountain
pH	50	8.62	20.75	30.61
Alkalinity	100	>100	>100	>100
Fe	99.78	0.39	21.05	0
Al	96.38	0	>62	>62
Mn	3.3	0	17.02	0

Hasil dari penelitian ini memperlihatkan kelebihan serta kekurangan antara sistem pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) *Open Limestone Drain* (OLD) dengan *Anoxic Limestone Drain* (ALD) Tabel 6.

Tabel 6. Kelebihan dan Kekurangan Sistem OLD dan ALD

Metode	Kelebihan	Kekurangan
OLD	Dapat menaikkan nilai pH untuk air dengan pH yang cukup rendah	Keefektifan sistem dapat berkurang karena endapan hidroksida yang terbentuk di permukaan <i>limestone</i>
	Efektif dalam menurunkan konsentrasi logam Fe dan Al yang terlarut	Tidak efektif pada air dengan <i>flow rate</i> yang rendah
	Efektif dalam menurunkan kandungan logam lainnya seperti Zn, Cu, Pb, dan Ni	Kurang efektif dalam menurunkan kandungan logam Mn
	Efektif pada air dengan <i>flow rate</i> yang relatif cepat	
	Memiliki <i>retention time</i> yang relatif lebih cepat	
ALD	Dapat menghalangi pembentukan endapan hidroksida dipermukaan <i>limestone</i>	Kurang efektif dalam menurunkan konsentrasi logam Fe, Al, Mn
	<i>Dissolution rate</i> dari <i>limestone</i> yang relatif cepat karena adanya tekanan CO2 di dalam sistem	Tidak dapat menurunkan kandungan logam terlarut lainnya seperti Z, Cu, Pb, dan Ni
	Efektif pada air dengan <i>flow rate</i> yang relatif rendah	Membutuhkan <i>retention time</i> yang relatif lama
		Tidak efektif pada air dengan <i>flow rate</i> yang relatif cepat

PENUTUP

Penelitian ini menunjukkan perbedaan metode *Open Limestone Drain* (OLD) dan *Anoxic Limestone Drain* (ALD) dimana metode OLD sangat sesuai apabila diterapkan pada AAT dengan nilai pH yang sangat rendah dengan kandungan logam yang tinggi karena kemampuan penetralannya yang lebih baik dibanding ALD. Sedangkan metode ALD dapat menaikkan nilai pH namun tidak dapat menurunkan kandungan logam pada AAT. Hasil penelitian ini dapat memudahkan para praktisi di lapangan dalam menentukan metode pengolahan yang tepat dan sesuai karakteristik AAT yang akan diolah. Selain itu, penelitian ini memanfaatkan data sekunder dari studi-studi yang telah dilakukan sebelumnya. Saran dari penulis, untuk penelitian selanjutnya dapat dikombinasikan dengan penelitian langsung di laboratorium sehingga hasil penelitian dapat lebih representatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih diberikan kepada Ibu Dr. Ir. Dyah Tjahyandari Suryaningtyas, MAppSc. selaku Dosen Pengampu Mata Kuliah Pengelolaan Lahan dan Reklamasi di Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan, Institut Teknologi Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- Bigham, J. M. (1996). Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 2111–2121.
- Brady, K. B. C. (1997). Bimodal distribution of pH in coal-mine drainage (abs). *Geological Society of America, GSA Abstracts with Programs*, 29(1), 32.
- Brant, D. L., & Ziemkiewicz, P. F. (1997). Passive removal of manganese from acid mine drainage. In *Proceedings of the 1997 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation* (pp. 741–744). Princeton, WV: American Society for Surface Mining and Reclamation.
- Cravotta, C. A. (2003). Size and performance of anoxic limestone drains to neutralize acidic mine drainage. *Journal of Environmental Quality*, 32(4), 1277–1289.
- Cravotta, C. A., & Trahan, M. K. (1999). Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage. *Applied Geochemistry*, 14(5), 581–606.
- Ferris, F. G., Tazaki, K., & Fyfe, W. S. (1989). Iron oxides in acid mine drainage environments and their association with bacteria. *Chemical Geology*, 74, 321–330.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Gautama, R. S. (2019). *Pembentukan, Pengendalian Dan Pengelolaan Air Asam Tambang* (2nd ed.). ITB Press.
- Hedin, R. S., Nairn, R. W., & Kleinmann, R. L. P. (1994). Passive treatment of coal mine drainage. *Information Circular* 9389, 1–44.
- Hem, J. D. (1978). Redox processes at surfaces of manganese oxide and their effects on aqueous and metal ions. *Chemical Geology*, 21, 199–218.
- Hill, R. D., & Wilmoth, R. C. (1971). Limestone treatment of acid mine drainage. *Transactions of the Society of Mining Engineers*, 250, 162–166.
- Lasaga, A. C. (1981). Rate laws of chemical reactions. In A. C. Lasaga & R. J. Kirkpatrick (Eds.), *Kinetics of geochemical processes* (Vol. 8, pp. 1–68). Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America.
- McKenzie, R. M. (1980). The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. *Australian Journal of Soil Research*, 18, 61–73.

- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In G. S. Plumlee & M. J. Logsdon (Eds.), *The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A. Processes, methods, and health issues* (pp. 133–160). Reviews in Economic Geology, 6A. Society of Economic Geology.
- Nugraha, C. (2019). *Pengelolaan Lingkungan Pertambangan* (1st ed.). Kepak Indonesia.
- Powell, J. D. (1988). Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States. *Environmental Geology and Water Science*, 11, 141–152.
- Rose, S., & Ghazi, A. M. (1997). Release of sorbed sulfate from iron oxyhydroxides precipitated from acid mine drainage associated with coal mining. *Environmental Science & Technology*, 31, 2136–2140.
- Turner, D., & McCoy, D. (1990). Anoxic alkaline drain treatment system, a low-cost acid mine drainage treatment alternative. In D. H. Graves & R. W. DeVore (Eds.), *Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation* (pp. 73–75). University of Kentucky.
- Wood, C. R. (1996). Water quality of large discharges from mines in the anthracite region of eastern Pennsylvania. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4243*.
- Yang, Y. (2023). A review of treatment technologies for acid mine drainage and sustainability assessment. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 1–13.9