

Permeable Reactive Barrier sebagai inovasi remediasi air asam tambang yang berkelanjutan dan ramah lingkungan di Indonesia

Permeable Reactive Barrier as a sustainable and environmentally friendly innovation for acid mine water remediation in Indonesia

Abiyyu Alghifary, Yeremia Imanuel Sihombing

Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, (022) 2500935
e-mail: *abivyuag22@gmail.com, yeremiai27@gmail.com

ABSTRAK

Pertambangan merupakan jenis industri yang menguntungkan tetapi juga berisiko tinggi. Salah satu dampak negatif yang ditimbulkan adalah air asam tambang. Air asam tambang adalah air yang memiliki pH rendah dan terbentuk karena adanya mineral sulfida yang tersingkap dan teroksidasi akibat aktivitas penambangan. Salah satu inovasi yang dapat dilakukan untuk mencegah dan mengurangi kontaminan yang terkandung dalam air asam tambang ke dalam sumber air sekitar maupun permukaan tanah adalah dengan teknologi Permeable Reactive Barrier (PRB). PRB ini adalah salah satu teknologi remediasi in situ yang berkelanjutan untuk menangani air asam yang terkontaminasi di sekitar area pertambangan. Konsep dari PRB ini adalah dengan menggunakan media berpori fisik dengan bahan kimia tertentu melalui proses kimia, biokimia dan geohidrologi. Tujuan penulisan ini adalah untuk mengetahui potensi PRB dalam menyaring kandungan kontaminan dalam air asam tambang yang mengalir melaluinya. Penelitian ini menggunakan metode kualitatif deskriptif analitis dengan teknik pengumpulan data berupa studi pustaka. Penelitian ini mencakup beberapa langkah yaitu, analisis kandungan logam berat dalam air asam tambang, pemilihan media reaktif dan pembuatan desain dari PRB serta analisis keekonomian. Hasilnya adalah PRB ini dapat mengurangi kandungan asam dan logam berat yang signifikan dalam air asam tambang dan dapat dialirkan dengan aman ke lingkungan.

Kata-kata kunci: air asam tambang, remediasi, Permeable Reactive Barrier

ABSTRACT

Mining is a lucrative but also high-risk industry. One of the negative impacts is acid mine drainage. Acid mine water is water that has a low pH and is formed due to the presence of sulfide minerals that are exposed and oxidized due to mining activities. One of the innovations that can be done to prevent and reduce contaminants contained in acid mine drainage into surrounding water sources and the ground is the Permeable Reactive Barrier (PRB) technology. The PRB is one of the sustainable in situ remediation technologies to treat contaminated acid water around mining areas. The concept of this PRB is to use a physically porous medium with certain chemicals through chemical, biochemical, and geohydrological processes. The purpose of this paper is to determine the potential of PRB in filtering the content of contaminants in acid mine drainage that flows through it. This research uses a descriptive analytical-qualitative method with data collection techniques in the form of a literature study. This research includes several steps, namely, analysis of heavy metal content in acid mine drainage, selection of reactive media, and the design of DRR as well as economic analysis. The result is that this PRB can reduce the acid and heavy metal content significantly in acid mine drainage and can be safely discharged into the environment.

Keywords: Acid mine water, remediation, Permeable Reactive Barrier

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sampai saat ini, mayoritas penambangan mineral dan batubara umumnya dilakukan menggunakan metode tambang terbuka, dengan memindahkan tanah penutup (Overburden) untuk mengambil material yang diinginkan. Kegiatan pertambangan dapat menyebabkan banyak hal negatif yang ditimbulkan khususnya dalam perubahan tatanan lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Salah satu dampak negatif aktivitas penambangan mineral dan batubara adalah terbentuknya air asam tambang. Air asam tambang adalah air yang bersifat asam dan mengandung zat besi dan sulfat, karena terbentuk akibat aktivitas penambangan sebagai hasil reaksi dari mineral sulfida, khususnya pirit, dengan oksigen serta air. Air tambang ini mempunyai tingkat keasaman (pH) yang bernilai 6 (enam) atau lebih rendah.

Air asam tambang yang terbentuk bisa terinfiltrasi ke dalam sumber air permukaan atau air tanah yang akan berdampak pada terganggunya ekosistem makhluk hidup sekitarnya, seperti penurunan kualitas lingkungan juga

menimbulkan risiko kesehatan yang besar bagi biosfer sekitarnya terutama manusia. Pada umumnya, air asam tambang yang dihasilkan dari aktivitas penambangan di Indonesia ditangani dengan beberapa metode, diantaranya metode pengolahan aktif dan pengolahan pasif. Penanganan air asam tambang dengan pengolahan aktif dilakukan dengan menambahkan zat-zat kimia atau reagen penetral ke dalam sumber air asam tambang secara terus menerus dalam jangka waktu tertentu. Sedangkan pengolahan metode pasif dilakukan dengan memanfaatkan proses biogeokimia dengan membuat sistem rawa buatan, sumur pengalihan dan sebagainya dengan memperhatikan laju aliran, topografi lokal, dan karakteristik lokasi. Namun, kedua metode di atas masih mempunyai beberapa kekurangan dalam pengaplikasiannya. Diantaranya membutuhkan modal yang cukup tinggi, terbentuknya endapan hasil penambahan reagen yang berbahaya serta aspek teknis dan efisiensi yang terbatas (Barrera dkk., 2017). Berdasarkan permasalahan tersebut, maka diperlukan suatu inovasi baru untuk meremediasi air asam tambang dengan mengurangi bahkan menghilangkan

kandungan unsur kontaminan logam berat yang terkandung di dalamnya agar nantinya dapat dialirkan kembali dengan aman ke lingkungan yang tentunya terjangkau dalam segi biaya, ramah lingkungan dan mempunyai efisiensi tinggi dalam pemakaiannya.

Di lain sisi, beberapa limbah lain di sektor pertambangan pun cukup menjadi perhatian untuk ditangani secara tepat saat ini, yaitu fly ash dan coconut shell waste. Fly ash atau yang biasa disebut dengan limbah terbang batubara adalah salah satu jenis limbah padat hasil pembakaran batubara di boiler PLTU. Jumlah fly ash ini juga diproyeksikan akan terus naik mengingat Indonesia masih mengandalkan PLTU sebagai salah satu pemasok listrik terbesar negara dan pemanfaatan fly ash ini di Indonesia hanya terealisasi sebesar 10-12% (Ekaputri dkk., 2019). Jenis limbah yang lainnya adakah coconut shell waste atau limbah sabut kelapa. Limbah sabut kelapa ini walaupun termasuk waste di luar aktivitas penambangan, limbah ini mempunyai potensi keterdapatan dan kegunaan yang cukup besar untuk dioptimalkan. Sabut kelapa merupakan bagian yang cukup besar dari buah kelapa, yaitu 35 % dari berat keseluruhan buah (Titi Indahyani, 2011).

Salah satu inovasi teknologi untuk remediasi air asam tambang yang menjadi perhatian saat ini adalah Permeable Reactive Barriers (PRBs). Permeable Reactive Barriers (PRBs) adalah salah satu teknologi pengolahan pasif pemulihan sumber air berupa dinding penghalang reaktif permeabel in situ (yang akan dipasang langsung di tempat penampungan air asam tambang atau sump) yang bereaksi dengan unsur logam tertentu dan berfungsi untuk mereduksi atau menghilangkan unsur kontaminan logam berat yang berbahaya pada air asam tambang yang melewatinya sehingga nantinya air yang dihasilkan sudah aman untuk kembali dialirkan ke lingkungan. PRBs ini nantinya akan diisi dengan media reaktif yang berperan untuk mencegat dan mendekontaminasi kontaminan di air asam tambang.

Dalam pengaplikasiannya, teknologi PRBs ini sudah cukup sering digunakan untuk mengurangi dan membersihkan kontaminan seperti senyawa organik dan anorganik. PRB pada implementasinya sudah beberapa kali digunakan dalam penghilangan berbagai macam kontaminan yang ditemukan di air tanah seperti As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Se, dan fosfat. Salah satu penelitian dilakukan oleh Jiwei Liu dkk., (2017) untuk mengetahui efisiensi PRBs dalam menghilangkan kontaminasi Pb(II) dan Cr(VI) di lokasi tambang yang ditinggalkan dengan menggunakan media reaktif berupa besi bervalensi nol. Penelitian lain dilakukan juga oleh Ayanda dkk., (2017) dengan menggunakan teknologi PRBs untuk remediasi kontaminan pada aliran bawah tanah/groundwater dari banyak unsur kontaminan seperti Cd, Zn dan SO₄²⁻ (ion sulfat) dan terbukti efektif pada jangka waktu yang lama dalam menghilangkan unsur kontaminan logam berat pada air asam tambang yang mengalir melewati aliran air tanah. Sedangkan dalam pengaplikasiannya untuk penanganan air asam tambang di permukaan, belum ada penelitian yang mendalam tentang fungsi PRBs untuk menghilangkan kontaminan logam berat di dalamnya.

Teknologi PRBs ini muncul karena kebutuhan untuk mengembangkan metode remediasi air asam tambang yang efektif, lebih hemat biaya dan lebih tahan lama daripada metode konvensional. Alasan lainnya adalah adanya perhatian saat ini terhadap isu perubahan iklim dan

pencemaran limbah tambang. PRBs yang menjadi salah satu metode remediasi berkelanjutan yang potensial untuk diterapkan pada pemulihan sumber air di permukaan. Karya tulis ini bertujuan untuk memberikan gambaran implementasi teknologi Permeable Reactive Barriers (PRBs) untuk remediasi air asam tambang permukaan dengan konsep yang ramah lingkungan. Di akhir, diberikan analisis keekonomian untuk mengetahui tingkat probabilitas dan efektivitas dari penggunaan PRBs di Indonesia.

Rumusan Masalah

1. Air asam tambang masih menjadi salah satu masalah akibat aktivitas penambangan mineral dan batubara di Indonesia.
2. Pengolahan air asam tambang di Indonesia dengan metode konvensional belum optimal dalam segi efektivitas dan biaya.
3. Dibutuhkan suatu inovasi untuk remediasi unsur kontaminan logam berat yang terdapat dalam air asam tambang yang optimal dari segi efektivitas dan biaya.
4. *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) dengan menggunakan bahan dari *waste* di sektor pertambangan dan tambahan lainnya yang mendukung menjadi salah satu solusi untuk remediasi unsur kontaminan logam berat pada air asam tambang yang mempunyai banyak kelebihan serta menciptakan prinsip *zero waste* di sektor pertambangan.

Tujuan Penelitian

Kami melakukan penelitian mengenai penggunaan *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) dengan menggunakan *waste* berupa campuran dari *clay soil*, *iron waste*, *fly ash* dan limbah sabut kelapa yang akan diterapkan untuk pengolahan air asam tambang hasil penambangan mineral dan batubara di Indonesia. Untuk material atau *waste* yang akan digunakan menggunakan sampel limbah hasil usaha pertambangan dari beberapa referensi. Akan digunakan juga beberapa referensi aplikasi PRBs ini di luar Indonesia dalam kurun waktu tertentu.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode kualitatif deskriptif analitis berupa studi literatur mengenai permasalahan air asam tambang yang umumnya terjadi di kegiatan pertambangan mineral dan batubara dan pembahasan tentang penelitian aplikasi *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) untuk remediasi air asam tambang beserta penelitian sebelumnya yang sudah pernah diteliti. Data dan informasi mengenai penelitian yang sebelumnya sudah dilakukan dan data yang mendukung lainnya dikumpulkan dengan melakukan tinjauan pustaka, dan pencarian sumber-sumber yang relevan.

METODOLOGI

Air Asam Tambang

Air asam tambang adalah air yang bersifat asam dan mengandung zat besi dan sulfat, yang terbentuk akibat aktivitas penambangan sebagai hasil reaksi dari mineral sulfida, khususnya pirit, dengan oksigen serta air. Air tambang ini mempunyai tingkat keasaman (pH) yang bernilai 6 atau lebih rendah. Air asam tambang ini dapat terbentuk dari kegiatan penambangan batubara maupun

mineral, baik pada pertambangan permukaan maupun pertambangan bawah tanah. Kualitas air tambang, asam atau alkali, bergantung pada ada atau tidaknya kandungan mineral asam (sulfida) dan material alkali (material karbonat) pada area yang ditambang. Umumnya material yang banyak mengandung sulfida dan mengandung sedikit material alkali cenderung membentuk air asam tambang. Sebaliknya material yang banyak mengandung alkali, walaupun mengandung material sulfida dengan konsentrasi yang banyak, sering menghasilkan air asam (Nusa Idaman Said, 2014). Jenis senyawa sulfida yang cenderung mudah untuk teroksidasi adalah sulfur yang terdapat dalam bentuk mineral sulfida seperti pyrite (paling umum), marcasite, pyrrhotite, chalcocite, covellite, molybdenite, chalcopyrite, galena, sphalerite, dan arsenopyrite.

Batas Mutu Air Asam Tambang

Sebelum air asam tambang yang ditampung akan dialihfungsikan kembali ke lingkungan, tentunya harus ada pengolahan untuk menghilangkan kandungan unsur kontaminan logam berat dalam air asam tambang tersebut. Salah satu acuan standar minimal zat-zat yang terkandung dalam air asam tambang diatur pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 202 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Bijih Emas dan atau Tembaga yang dijelaskan mengenai parameter-parameter serta kandungan beberapa logam berat pada air limbah penambangan bijih emas dan atau tembaga seperti pada tabel-1.

Tabel-1. Baku Mutu Air Asam Tambang pada Kegiatan Penambangan Emas dan atau Tembaga

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum	Metode Analisis***
pH		6 – 9	SNI 06-6989-11-2004
TSS	mg/L	200	SNI 06-6989-3-2004
Cu*	mg/L	2	SNI 06-6989-6-2004
Cd*	mg/L	0,1	SNI 06-6989-18-2004
Zn*	mg/L	5	SNI 06-6989-7-2004
Pb*	mg/L	1	SNI 06-6989-8-2004
As*	mg/L	0,5	SNI 06-2913-1992
Ni*	mg/L	0,5	SNI 06-6989-22-2004
Cr *	mg/L	1	SNI 06-6989-14-2004
CN **	mg/L	0,5	SNI 19-1504-1989
Hg *	mg/L	0,005	SNI 06-2462-1991

(Sumber : KEPMENLH No. 202/2004)

Keterangan :

•* = Sebagai konsentrasi total ion logam terlarut .

•** = Parameter khusus untuk pengolahan bijih emas yang menggunakan proses Cyanidasi. •CN dalam bentuk CN bebas.

*** = Jika ada versi yang telah diperbaharui, maka digunakan versi yang terbaru

Pembentukan Air Asam Tambang

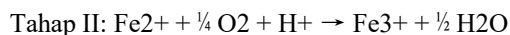
Air asam tambang akan terbentuk di kondisi tertentu. Pembentukan air asam tambang dapat terjadi ketika terdapat mineral sulfida yang tersingkap akibat penggalian dan penimbunan batuan penutup yang kemudian mengalami oksidasi dan bereaksi dengan air hujan atau air permukaan. Beberapa logam sulfida yang sering dijumpai pada penambangan mineral dan batubara antara lain FeS (pyrite), FeS₂ (marcasite), FeS_x (pyrrhotite), PbS (galena), Cu₂S (chalcocite), CuS (covellite), CuFeS₂ (chalcopyrite), MoS₂ (molybdenite), NiS (millerite), ZnS (sphalerite), dan FeAsS (arsenopyrite).

Reaksi pembentukan air asam tambang menurut Abfertiawan (2016) dapat dilihat berdasarkan tahapan reaksi berikut :



Pyrite + Oxygen + Water → Ferrous Iron + Sulfate + Acid

Reaksi pertama adalah reaksi pelapukan dari pyrite (pirit) disertai proses oksidasi. Sulfur dioksidasi menjadi sulfat dan besi-fero dilepaskan.



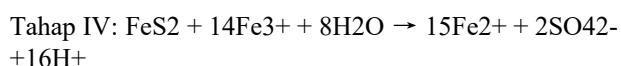
Ferrous Iron + Oxygen + Acidity → Ferric Iron + Water

Reaksi kedua terjadi konversi dari besi-fero menjadi besi-feri yang mengkonsumsi satu mol keasaman. Laju reaksi lambat pada pH < 5 dan kondisi abiotik.



Ferric Iron + Water → Ferric Hydroxide (yellowboy) + Acid

Reaksi ketiga adalah hidrolisis dari besi. Hidrolisis adalah reaksi yang memisahkan molekul air. Tiga mol keasaman dihasilkan dari reaksi ini. Pembentukan presipitasi ferri hidroksida tergantung pH, yaitu lebih banyak pada pH di atas 3,5.



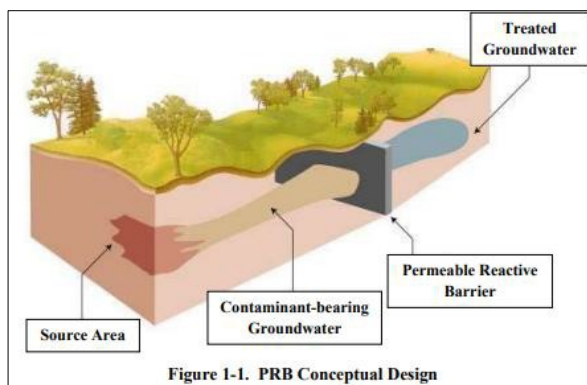
Pyrite + Ferric Iron + Water → Ferrous Iron + Sulfate + Acid

Reaksi keempat adalah oksidasi lanjutan dari pirit oleh besi ferri. Ini adalah reaksi propagasi yang berlangsung sangat cepat dan akan berhenti jika pirit atau besi ferri habis. Agen pengoksidasi dalam reaksi ini adalah besi-feri.

Permeable Reactive Barriers

Permeable Reactive Barriers (PRBs) adalah salah satu teknologi permeabel yang menggunakan pori-pori media yang bersifat reaktif terhadap unsur kimia tertentu untuk remediasi kontaminan pada sumber air yang tercemar agar dapat dialirkan kembali ke lingkungan dengan aman dengan standar baku mutu tertentu. PRBs ini biasanya bersifat in situ yang akan ditempatkan di saluran tempat penampungan air asam tambang dalam area penambangan dan melakukan prosesnya di tempat. PRBs ini sudah digunakan di berbagai tingkat pengolahan kontaminan untuk memperbaiki struktur dan kandungan air tanah.

Proses penghilangan kontaminan dengan PRBs pada air asam tambang dilakukan karena adanya kontak fisik unsur logam berat terhadap media reaktif dengan menggunakan proses kimia dan biokimia agar hasil akhirnya aman untuk dialirkan kembali ke lingkungan dan sesuai standar baku mutu yang ada. Penerapan PRBs untuk remediasi kontaminan pada air tanah digambarkan pada gambar-1.



(Sumber : Claire.co.uk)

Gambar-1. PRBs untuk Remediasi Air Tanah

Pemilihan Bahan Reaktif untuk PRB

Kemampuan PRBs untuk remediasi unsur kontaminan logam berat pada *sump* air asam tambang nantinya sangat bergantung pada jenis media reaktif yang digunakan. Untuk menciptakan pori-pori pada PRBs yang optimal dan dalam rangka menerapkan prinsip *zero waste* di sektor pertambangan. Pada penelitian ini kami menggunakan beberapa waste yaitu *fly ash*, *coconut shell waste*, *clay soil* dan *iron waste* sebagai bahan utama untuk mengkonstruksikan PRBs. Penggunaan *waste* di sektor pertambangan untuk konstruksi PRBs ini juga mempunyai kelebihan yaitu efisiensi yang tinggi dan biaya ekonomi yang relatif rendah. Berikut adalah beberapa detil dari bahan yang kami gunakan.

1. *Fly Ash* (Abu terbang batubara)

Abu terbang batubara atau yang biasanya disebut dengan *fly ash* adalah limbah padat yang dihasilkan oleh pembakaran batubara di PLTU yang terlihat seperti debu halus berwarna hitam pekat dan biasanya “terbang” ke udara. Jumlah *fly ash* yang dihasilkan sekitar 15% -17 % dari tiap satu ton pembakaran batubara (Safitri dkk., 2009).



(Sumber : <http://www.apbi-icma.org/>)

Gambar-2. *Fly ash* batubara

Menurut Kementerian KLHK, pada tahun 2020 limbah *fly ash* yang dihasilkan oleh PLTU batubara yaitu sebesar 2,9 juta ton (Kementerian KLHK, 2020). Hal ini pun menjadi perhatian utama dalam meminimalisasi pengelolaan *fly ash* yang belum maksimal. *Fly ash* ini juga kami gunakan mengingat cukup banyak PLTU yang berada dekat dengan lokasi penambangan batubara. Komposisi secara umum dari *fly ash* ini dapat dilihat pada tabel-2.

Fly ash ini akan disintesis menjadi zeolit organik, yang menjadi salah satu jenis bahan penyerap dan penukar ion yang nantinya akan menjadi salah satu campuran untuk media reaktif utama dalam PRBs berupa MMW-ZVI (*Modified Mining Waste – Zero Valent Iron*) yang akan menjadi media reaktif utama dalam mereduksi dan

mengikat berbagai macam unsur kontaminan logam berat dalam air asam tambang. Tambahan lainnya yaitu zeolit organik ini dapat memperluas area permukaan pori pada PRBs, meningkatkan tingkat reaktivitas, reduktivitas dan energi permukaan PRBs untuk menghilangkan unsur kontaminan logam berat dengan konsentrasi yang tinggi (Battelle Memorial Institute March, 2012). *Fly ash* juga biasanya banyak mengandung unsur/zat alkali seperti kuarsa dan mullite (KIM, 2012) yang dapat memperkuat struktur dari PRBs dalam jangka waktu yang lama. Partikel kaca (misalnya kuarsa, dan mullite) juga merupakan bagian utama dari material ini membuat *fly ash* menjadi komposit yang baik untuk pembuatan geopolimer.

Tabel-2. Kandungan *fly ash* secara umum

Tipe Abu Batu bara	LiO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO3 (%)
<i>Fly Ash</i>	14.48	23.61	14.09	9.15	22.89	2.71	13.13

(Sumber : Abdul Karim dkk., 2013)

2. *Coconut Shell Waste* (Limbah Sabut Kelapa)

Kelapa merupakan jenis tanaman yang banyak dijumpai di seluruh bagian Indonesia, sehingga hasil alam berupa kelapa di Indonesia sangat melimpah. Sabut kelapa adalah limbah terbesar dari buah kelapa dengan persentase sebesar 42% (Aprilia dkk., 2017). Limbah sabut kelapa ini mengandung banyak senyawa hidrokarbon yang mempunyai kandungan karbon sebesar 74.3% (Sujiono, dkk., 2020). Salah satu senyawa penting yang terkandung dalam limbah sabut kelapa ini adalah adanya senyawa graphene oxide (GO) yang memiliki sifat mekanik dan termodinamik jika bereaksi dengan unsur lain yang sangat baik. Limbah sabut kelapa ini juga menutup kelemahan dari ZVI (*Zero Valent Iron*) dalam stabilisasi unsur dan mengurangi aglomerasi partikel.



(Sumber : Timlo.net)

Gambar-3. Limbah Sabut Kelapa

3. *Clay Soil* (Tanah liat)

Clay Soil atau tanah liat adalah tanah yang memiliki partikel-partikel mineral tertentu yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air. Partikel mineral utama yang terkandung dalam tanah liat ini diantaranya unsur silika dan aluminium yang memiliki diameter kurang dari 4 (empat) mikrometer. Silika adalah salah satu unsur anorganik yang memiliki sifat stabil terhadap pengaruh mekanik, panas, pelarut organik, dan pada kondisi pH ekstrem (Mulder, 1996), sehingga silika dari tanah liat ini dapat dibuat menjadi membran penyaring unsur kontaminan logam berat pada air asam tambang. Hal ini juga kami teliti bahwa Indonesia mempunyai potensi keterdapatannya tanah liat yang sangat kaya di berbagai macam industri di banyak daerah. Tanah liat ini berfungsi sebagai fondasi utama dan struktur dari PRBs yang akan dibuat nantinya.



(Sumber : <https://www.thespruce.com/understanding-and-improving-clay-soil>)

Gambar-4. Clay Soil



(Sumber : semanticscholar.org)

Gambar- 5. Iron Powder Waste

4. Iron Waste (Limbah Serbuk Besi)

Limbah serbuk besi didapatkan dari bagian pengolahan bijih besi pada unit *Crushing Plant*. Menurut Kusno dkk., (2016), dihasilkan sekitar 30% limbah berupa serbuk bijih besi dari proses pengolahan bijih besi pada waktu pengolahan. Limbah ini digunakan untuk membuat PRBs lebih permeabel dan mempermudah air mengalir di pori PRBs. *Iron waste* atau Serbuk besi ini juga akan membuat filter menjadi *porous* sehingga luas permukaan filter akan meningkat. *Iron waste* ini akan menjadi bahan utama untuk sintesis unsur ZVI (*Zero Valent Iron*) yang akan menjadi campuran utama dalam membuat media reaktif utama MMW-ZVI dan juga dalam remediasi unsur kontaminan logam berat pada air asam tambang yang akan dijelaskan nantinya.

Metode Pembuatan PRBs

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, PRBs pada penelitian kami dibuat dengan menggunakan beberapa macam *waste* di sektor pertambangan. Bahan-bahan yang diperlukan untuk membentuk PRBs pada penelitian ini adalah *fly ash*, tanah liat (*clay soil*), serbuk besi dari limbah pengolahan dan limbah sabut kelapa. Dari 4 (empat) macam *waste* yang dibutuhkan, tentunya masing-masing bahan akan diolah terlebih dahulu sebelum dilakukan pencampuran untuk mengkonstruksikan PRBs. Berikut adalah langkah-langkah pembuatan PRBs secara garis besar:

1. Preparasi *Fly Ash*

Fly ash yang sudah disiapkan akan diayak terlebih dahulu untuk mendapatkan ukuran partikel *fly ash* dengan ukuran 45-50 μm dan densitas 2.6 g/cm^3 . Lalu sampel *fly ash* yang telah diayak akan dikeringkan selama 2 jam dan akan ditambahkan dengan larutan NaOH dengan rasio *fly ash* dengan larutan NaOH sebesar 1:3 (Maria Harja dkk., 2012). Setelah itu akan disaring, dicuci dan dikeringkan kembali.

2. Preparasi Limbah Sabut Kelapa untuk Sintesis Graphene Oksida

Limbah sabut kelapa akan dicuci dan dibersihkan dari serabutnya, dan kemudian dikeringkan terlebih dahulu selama 12 jam. Lalu sampel akan dihancurkan dengan ukuran partikel 2-3 mm. Setelah itu sampel akan dikarbonisasi dengan proses destilasi selama 3 jam untuk menghasilkan sabut kelapa yang mengandung tingkat karbon yang tinggi (*high-carbon coconut shell*). Sampel kemudian akan digerus untuk mendapatkan bubuk sabut kelapa sebesar 75 μm . Kemudian, sampel dicuci dengan

asam hidrofluorat (HF) 40% dengan rasio 1:3 untuk menghilangkan senyawa pengotor. Setelah itu dikeringkan dan didapatkanlah serbuk graphene oksida.

3. Preparasi Iron Waste

Limbah serbuk besi ini tentunya tidak bisa langsung ditambahkan pada campuran membran keramik dan harus dilakukan pencucian dan kominusi dari limbah serbuk besi. Ukuran partikel dari serbuk besi yang digunakan adalah 250 sampai 500 μm .

4. Pencampuran Bahan *Waste* untuk mendapatkan MMW-ZVI (Modified Mining Waste – Zero Valent Iron)

Menurut penelitian Yongmei Wang dkk., (2017), *Zero Valent Iron* bisa didapatkan dari pencampuran iron waste dengan graphene oksida pada limbah sabut kelapa yang sudah diolah. Namun, zero valent iron yang dihasilkan belum mempunyai tingkat reduktivitas dan stabilisasi yang baik dan dibutuhkan modifikasi lebih lanjut. Setelah semua bahan sudah dilakukan preparasi awal, akan dilakukan pencampuran untuk mendapatkan MMW-ZVI PRBs yang akan dikonstruksi. Sampel Zeolit (karbon aktif dengan sumber *fly ash*), *Zero Valent Iron* (sumber dari campuran *iron waste* dengan limbah sabut kelapa), dan *clay* akan dicampur dengan rasio masing-masing 1:2:2 yang selanjutnya akan dikeringkan selama 24 jam dan diayak dengan 200 mesh. Setelah itu akan ditambahkan air distilasi 10% dan diolah selama 30 menit. Material yang sudah dicampur dan diolah secara mekanis akan dibentuk menjadi partikel silinder. Selanjutnya akan disinterisasi dengan selama 90. Setelah itu partikel yang sudah disinter akan dilakukan pendinginan. Hasilnya adalah media adsorben reaktif MMW-ZVI (Modified Mining Waste – Zero Valent Iron) yang sudah dimodifikasi dan mempunyai kapasitas adsorpsi terhadap beberapa unsur kontaminan yang bervariasi.

Instalasi dan Desain PRB

PRBs yang akan dikonstruksikan nantinya akan dipasang pada di tengah jalur *sump* (tempat penampungan air asam tambang). Awalnya akan dibangun konstruksi berupa parit yang memiliki panjang secara mendatar dan luasnya akan disesuaikan dengan *sump* untuk memaksimalkan ukuran PRBs yang nantinya akan diterapkan. Desain PRBs yang digunakan adalah desain PRBs dengan penghalang multi (*multi barriers*) dimana media reaktif didistribusikan di seluruh area dari PRBs. Penggunaan desain penghalang multi diterapkan agar efektif dalam remediasi kontaminan secara berurutan dalam jumlah yang banyak dan membutuhkan waktu *maintenance*

yang minim. (Imma Bortone dkk, 2012) . Skema dan gambaran pemasangan konstruksi PRBs dapat dilihat pada gambar-6.

Dimensi PRBs yang digunakan dalam penelitian iniditunjukkan pada Gambar-7 dan mencakup panjang (y) tegak lurus terhadap air tanah, ketebalan aliran, atau lebar (z), dan kedalaman (x).

1. Panjang

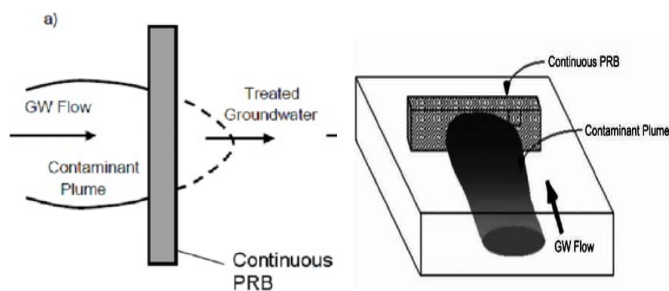
PRBs harus cukup panjang untuk mengolah seluruh lebar unsur kontaminan (dimensi tegak lurus aliran air tanah). Jika PRBs yang diterapkan nantinya bersifat *multi barriers*, bagian yang berdampingan harus tumpang tindih untuk mengurangi waktu monitoring dan *maintenance* nantinya.

2. Tebal (lebar)

Kinerja dan efektivitas PRBs dalam remediasi unsur kontaminan logam berat dalam air asam tambang sangat bergantung dari jumlah media reaktif yang terdapat pada PRBs. Zona dari media reaktif harus cukup besar (tebal dan lebar) untuk memungkinkan proses degradasi unsur kontaminan logam berat. Ketebalan PRBs dirancang berdasarkan waktu tinggal kontaminan yang dibutuhkan dan kecepatan aliran air tanah. Waktu tinggal adalah waktu kontak kontaminan dengan media reaktif, yang bergantung pada laju degradasi penyusun dan konsentrasi kontaminan maksimum. Waktu tinggal harus cukup untuk memungkinkan remediasi kontaminan. Secara sederhana, ketebalan aliran PRBs yang dibutuhkan, z, dapat ditentukan sebagai $(V) \cdot (t)$, di mana V adalah kecepatan aliran air asam tambang yang dialirkan di *sump* dan t adalah waktu tinggal. Pemodelan hidrologi dan pengukuran langsung (pengukur kecepatan, pelacak pewarna) dapat digunakan untuk menentukan kecepatan air tanah yang diantisipasi, V, melalui PRBs.

3. Kedalaman

Agar konstruksi kuat, PRBs harus mempunyai luasan yang cukup dan dimasukkan ke dalam lapisan batuan dasardari saluran *sump* yang kompeten. Lapisan batuan pada dasar sump tempat PRBs dikonstruksikan juga harus mempunyai permeabilitas yang terkontrol agar air asam tambang yang tertampung tidak terinfiltrasi dan mengalir ke lapisan air tanah. Pemantauan air tanah di bawah PRBs harus dilakukan untuk mendokumentasikan bahwa tidak terjadi *bypass* kontaminan.



(Sumber : Imma Bortone dkk, 2012)

Gambar-6. Model Instalasi PRBs

HASIL DAN DISKUSI

Prinsip Remediasi Kontaminan dengan MMW-ZVI PRBs

Secara umum, mekanisme penghilangan kontaminan pada air asam tambang menggunakan PRBs berlangsung melalui 3 proses utama : (i) Degradasi, (ii) Presipitasi, dan (iii) Serapan.

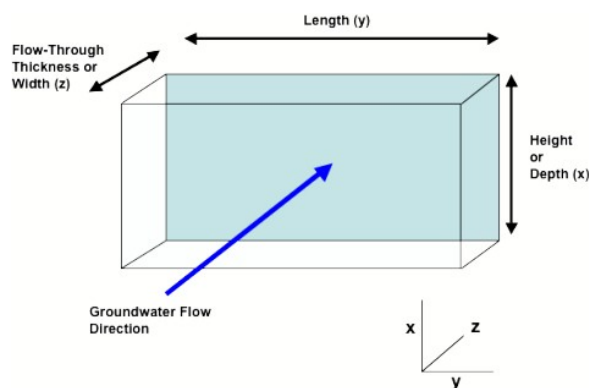
Degradasi adalah proses oksidasi-reduksi senyawa organik dimana akan terjadi penguraian kontaminan (unsur-unsur berbahaya) menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Salah satunya adalah reduksi kandungan ion kompleks seperti sulfat atau ion tunggal seperti Cu(II) dan Zn(II) yang akan menurunkan tingkat keasaman dari air asam tambang. Pada proses ini, kontaminan juga sebagian besar akan terperangkap ketika teralirkan melalui pori bahan reaktif di bawah gradien alaminya.

Lalu selanjutnya adalah tahap presipitasi dimana akan terjadi imobilisasi unsur kontaminan logam berat dalam zona reaksi dengan pembentukan senyawa yang tidak dapatlarut. Di sini, keadaan kimiawi kontaminan tidak akan diubah. Yang terakhir adalah penyerapan atau adsorpsi dimana akan terjadi proses pemisahan antara pelarut dengan zat terlarut. Pelarut dipisahkan dari zat terlarut yang akan tertahan pada pori-pori media reaktif PRBs. Jenis gaya pendorong yang ada pada proses pemisahan dengan menggunakan PRBs yaitu perbedaan tekanan, perbedaan konsentrasi, dan perbedaan temperatur.

Spesifikasi MMW-ZVI PRBs yang telah dibuat

Dari hasil PRBs yang telah dibuat, masing-masing dari material waste memberikan karakteristik dan kapasitas adsorpsi unsur kontaminan logam berat di air asam tambang yang berbeda-beda. Dari beberapa referensi yang ada, didapatkan karakteristik dan kapasitas adsorpsi beberapa unsur kontaminan yang sering dijumpai pada air asam tambang yang terdapat pada Tabel 3. Kapasitas adsorpsi dari PRBs ini terhadap beberapa unsur kontaminan juga sudah mempetimbangkan beberapa hal diantaranya ; waktu kontak, jumlah konsentrasi sampel air asam tambang, suhu normal, dan efek pH.

Kapasitas Adsorpsi masing-masing unsur kontaminan yang dapat ditangani dapat dilihat pada tabel-3. Area permukaan spesifik dari MMW-ZVI PRBs ini yaitu sebesar 8.19 m²/g.



(Sumber: The Interstate Technology & Regulatory Council, 2011)

Gambar-7. Pertimbangan Dimensi PRBs

Tabel-3. Jenis Unsur Logam Berat Beserta Kapasitas Adsorpsi dari Media Reaktif MMW-ZVI

Jenis Logam Berat yang Ditangani	Qm (mg/g)	Referensi
Cu (II)	54.35	AhmedHamdy (2020)
Pb(II)	78.13	Jiwei Liu dkk (2017)
Cr(VI)	15.7	Jiwei Liu dkk (2017)
SO ₄ ²⁻ (ion sulfat)	146.1	Ximena Castillo dkk (2021)
Fe(II)	131.58	Min Xing dkk (2016)
Cd (II)	29.92	Jingmin Wan dkk (2021)
Zn (II)	27.93	D. Kolodyriskadkk (2017)
Cs (II)	89.32	Haixin Zang dkk (2021)
TSS	16	Abdul Karim dkk (2013)
COD	16	Abdul Karim dkk (2013)
As	4.56	Hafiz Ahmad dkk (2014)
Mn(II)	63.7	M.Mahidin dkk (2016)

Tabel-4. Karakteristik Sampel Air Asam Tambang 1

Parameters	Values	Unit
TDS	6.35	g/L
pH	2.0 ± 0.2	-
Fe	325.58	mg/L
Mg	209.40	mg/L
Ca	175.58	mg/L
Zn	120.72	mg/L
Cu	91.40	mg/L
Ni	3.30	mg/L
Al	157.80	mg/L
Na	49.98	mg/L
SO ₄	4.30	g/L

(Sumber : Seoung Chul Ryu dk., 2020)

Tabel-5. Hasil Analisis Sampel Air Asam Tambang 1

Unsur	Jumlah Awal dalam Sampel Air Asam Tambang (mg/L)	Jumlah Akhir Setelah Dilakukan Penambahan MMW-ZVI (mg/L)	Persentase Penghilangan Unsur
Fe	325.58	32.358	90.06%
Zn	120.72	58.479	52%
Cu	91.4	0	100.00%
Ni	3.3	~	~
So ₄	4.3	0	100%

Hasil Percobaan dan Efektivitas MMW-ZVI PRBs

Untuk mengetahui efektifitas dari MMW-ZVI PRBs yang sudah diteliti oleh kami dan untuk mengetahui tingkatkeekonomiannya, kami mengacu pada data dari referensi yang kami ambil. Penelitian yang kami jadikan acuan adalah yang dilakukan oleh Seoung Chul Ryu dkk., (2020). Sampel air asam tambang disini dibuat dengan mensintesis larutan air asam tambang dan dicampurkan beberapa unsurkontaminan secara manual dengan volume tertentu yang tertera pada tabel-4.

Pada penelitian tersebut, diketahui bahwa sampel air asam tambang yang diuji sebanyak 15 L. Untuk mengetahuimassa berat MMW-ZVI yang digunakan, akan digunakan referensi penelitian dari Batelle Memorial Institute (2012) yang menyebutkan bahwa 1 ton ZVI dibutuhkan untuk mengkonstruksikan PRBs seluas 586,95 yd³ atau 448,75 m³. Maka dengan penyederhanaan satuan didapatkan:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ ton MMW} - \text{ZVI} &= 448,75 \text{ m}^3 \\
 1 \text{ Kg MMW} - \text{ZVI} &= 448,75 \text{ liter} \\
 2,23 \text{ gram MMW} - \text{ZVI} &= 1 \text{ liter}
 \end{aligned}$$

Oleh karena itu, dibutuhkan 2,23 gram massa berat MMW-ZVI untuk setiap 1 liter sampel air asam tambang percobaan. Untuk menghitung volume masing-masing unsur setelah dilakukan penambahan dengan MMW-ZVI digunakan rumus :

$$qt = \frac{(c_0 - c_t) \times V}{m} \tag{1}$$

di mana qt (mg/g) adalah jumlah kandungan yang hilang dari masing-masing unsur , c₀ dan c_t (mg/L) adalah konsentrasi masing-masing unsur pada awal dan sembarang waktu , V (L) adalah volume larutan, m (g) adalah berat ZVI-GAM. Dengan sampel air asam tambang yang digunakan adalah 15 liter dan menggunakan 33.427 gram

massa berat MMW-ZVI untuk setiap 1 liter sampel air asam tambang menggunakan massa berbagai macam kapasitas adsorpsi masing-masing unsur yang dapat ditangani oleh media reaktif MMW-ZVI sesuai pada tabel X dan dengan menggunakan rumus diatas, maka untuk masing-masing unsur didapatkan volume akhir dalam mg/L sesuai dengan tabel-5.

Dari hasil tersebut, didapatkan hasil pengolahan air asam tambang dengan menggunakan penambahan MMW-ZVI sebagai media reaktif dengan persentase dari beberapa unsur kontaminan yang cukup besar dari unsur Fe,Zn,Cu dan Ni, sedangkan untuk unsur Ni belum ada penelitian terbaru untuk menentukan besaran kapasitas adsorpsi dari MMW-ZVI untuk menangani senyawa ini.

Analisis lainnya dilakukan dengan menggunakan data lain dengan referensi penelitian dari Ayanda Shabalala dkk., (2017). Pada penelitian ini, dilakukan analisis sampel air asam tambang yang berasal dari tambang emas dan batubara di Afrika Selatan yang tertera pada tabel-6.

Menurut referensi, akan digunakan sampel air asam tambang sebanyak 10 L dan karenanya akan digunakan juga 22.3 gram massa berat MMW-ZVI untuk setiap 1 litersampel air asam tambang. Dengan menggunakan rumus yang sama, didapatkan volume masing-masing unsur yangtertera pada tabel-7.

Dari hasil tersebut, didapatkan juga hasil pengolahan air asam tambang dengan menggunakan penambahan MMW- ZVI sebagai media reaktif dengan persentase beberapa unsur kontaminan lainnya seperti ion sulfat dan mangan yang cukup besar. Terdapat tingkat reduksi yang besar dariunsur Fe, Mn dan Zn sedangkan untuk ion sulfat sudah cukup baik. Dari kedua percobaan tersebut dengan masing- masing referensi, dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui karakteristik media reaktif yang digunakan dalam mengadsorpsi unsur kontaminan dalam air asam tambang.

Tabel-6. Karakteristik Sampel Air Asam Tambang 2 yang Digunakan

Element	DWA discharge standards (mg/L) [5]	Gold mine WZ (mg/L)
pH	5.5–9.5	4.15
Ca		582
Mg		170
Na		139
K		15
SO ₄ ²⁻		1123
Fe	0.3	12
Al	0.03	3
Mn		131
Zn	0.1	1.4
Cu	0.01	0.1
Co		0.3
Ni		1.3
Cr ⁶⁺	0.05	0.047
B	1.0	<0.2
Pb	0.01	<0.03

(Sumber : Ayanda Shabalala dkk., 2017)

Analisis Keekonomian

Untuk mengetahui tingkat keekonomian dari MMW-ZVIPRBs yang sudah diteliti, kami mengacu pada data dari referensi lain yang kami dapatkan. Penelitian yang kami jadikan acuan adalah yang dilakukan oleh Yusuf dkk., (2017). Pada penelitian ini akan digunakan sampel air asam tambang PT Bukit Asam Tbk di Pit 1 Timur Banko Barat. Tempat penampungan air asam tambang. Pit 1 Timur Banko Barat terdiri dari beberapa kompartemen dan juga diinformasikan mengenai beberapa spesifikasinya pada tabel-8.

Dengan dimensi Panjang, lebar dan kedalaman dari masing-masing kompartemen yang tertera, didapatkan total volume PRBs yang dibutuhkan di semua kompartemen pengelolaan air asam tambang pada tabel-9. Selanjutnya, hasil total volume dari PRBs ini nantinya akan digunakan untuk menganalisis tingkat keekonomisan dari PRBs yang diteliti.

Pada pengelolaan air asam tambang di *sump* Pit 1 Timur Banko Barat ini membutuhkan beberapa komponen biaya, yaitu biaya pemompaan, biaya pengapuran, biaya perawatan dan biaya modal. Untuk biaya utama yaitu biaya pengapuran dilakukan sebanyak 2 kali sehari dan didapatkan biaya pengapuran per bulan dan rata-rata pada tabel-10. yaitu sebesar Rp 94.333 /jam.

Biaya operator pada proses pengapuran adalah Rp 2.250.00/bulan per orang dengan jam kerja yang sama yaitu 240 jam/bulan maka didapat biaya total operator per jam adalah Rp 18.750 /jam. Berdasarkan perhitungan biaya tersebut maka didapat biaya total pengapuran di *sump* Pit 1 Timur Banko Barat adalah Rp 94.333 /jam. Selain biaya pengapuran, beberapa komponen biaya lainnya berupa biaya pemompaan, biaya perawatan KPL dan biaya modal yang masing-masing biaya tertera pada tabel-11.

Hasil analisis komponen-komponen biaya yang terdapat pada proses pengolahan air asam tambang maka didapat nilai biaya pemompaan adalah Rp 1.229.292 /jam, biaya pengapuran sebesar Rp 94.333 /jam, biaya perawatan KPL sebesar Rp 653,95/m³ dan biaya modal sebesar Rp 388.904/jam. Biaya total pengolahan air asam tambang berdasarkan hasil analisis tersebut adalah Rp 1.712.529 /jam. Untuk mengetahui biaya total per debit air yang

Tabel-7. Hasil Analisis Sampel Air Asam Tambang 2

Unsur	Jumlah Awal dalam Sampel Air Asam Tambang (mg/L)	Jumlah Akhir Setelah Dilakukan Penambahan MMW-ZVI (mg/L)	Persentase Penghilangan Unsur
SO ₄ ²⁻ (sulfat)	1123	634.63	43.49
Fe	9	0	100
Mn	131	37	71.76
Zn	2.8	0	100

masuk ke KPL maka harus diketahui terlebih dahulu debit rata-rata yang masuk ke KPL. Data debit rata-rata yang dipakai adalah data Bulan September 2018 sampai Januari 2019. Seperti pada Tabel-12.

Debit rata – rata adalah 300,29 m³/jam maka biaya total pengolahan air asam tambang di Pit 1 Timur Banko Barat PT. Bukit Asam, Tbk. dapat dihitung dengan membagi biaya total per jam dengan debit rata-rata. Sehingga didapat nilai biaya total pengolahan air asam tambang sebesar Rp 5.702,9 /m³. Biaya tersebut belum ditambah dengan biaya perawatan sebesar Rp 653,95 /m³, maka setelah dijumlahkan didapatkan biaya total pengolahan air asam tambang di Pit 1 Timur Banko Barat adalah Rp 6.356,85/m³air yang masuk ke *sump*.

Untuk mengetahui perbandingan biaya konvensional dengan penggunaan PRBs dalam pengelolaan air asam tambang, dibutuhkan beberapa referensi. Saat ini, belum ada penyelidikan terhadap biaya pemasangan PRBs untuk air asam tambang secara komprehensif di permukaan karena ini masih menjadi sistem pengelolaan yang baru. Namun, berdasarkan referensi aplikasi penerapan PRBs untuk pengolahan sumber air di berbagai macam daerah, PRBs ini mempunyai keunggulan dari segi biaya dan bersifat berkelanjutan. Dari penelitian yang dilakukan oleh Maria Harja dkk., (2012), dilakukan perbandingan biaya pengelolaan air asam tambang dengan metode konvensional menggunakan sistem pompa dan perawatan di *sump*. Hasilnya adalah biaya pengolahan air asam tambang dengan metode konvensional tersebut relatif lebih mahal dan disebutkan juga bahwa pengelolaan air asam tambang menggunakan PRBs dengan media reaktif besi bervalensi nol 5 (lima) kali lebih murah.

Dengan menggunakan referensi dari Batelle Memorial Institute (2012) yang mengaplikasikan PRBs dengan mediareaktif utama ZVI (*Zero Valent Iron*) dengan bahan campuran lainnya berupa karbon aktif dan material *biowaste*, dibutuhkan 23 (dua puluh tiga) ton dari partikel MMW-ZVI yang dibutuhkan untuk mengkonstruksikan PRBs dengan total volume 13.500 yd³. Oleh karena itu, dibutuhkan ZVI sebanyak 1 ton untuk mengkonstruksikan PRBs seluas 586,95 yd³ atau 448,75 m³.

Tabel-8. Dimensi *sump* Pit 1 Timur Banko Barat

Kompartemen	Dimensi Kolam		
	Panjang (m)	Lebar (m)	Kedalaman (m)
1	60,95	15,40	3
2	62,74	16,20	3
3	71,50	17,93	3
4	92,88	58,57	3
5	71,66	37,90	3
6	56,50	12,60	3
7	47,40	9,10	3

(Sumber: Yusuf dkk.,2017)

Tabel-9. Total Volume dari Masing-Masing Kompartemen di *sump* Pit 1 Timur Banko Barat

Kompartemen	Total Volume (m ³)
1	938.63
2	1,016
3	1282
4	5440
5	2716
6	712
7	431.34
Total Volume(m ³)	12,536

Tabel-10. Biaya Pengapuran *sump* Pit-1 Banko Barat

Bulan	Jumlah Kapur (Kg)	Biaya Kapur (Rupiah)
September (2018)	17925	17.925.000
Oktober (2018)	18450	18.450.000
November (2018)	18100	18.100.000
Desember (2018)	18300	18.300.000
Januari (2019)	17925	17.925.000
Total	90700	90.700.000
Rata-rata	18140	18.140.000

(Sumber : Yusuf dkk.,2017)

Tabel-11. Nominal untuk Masing-Masing Komponen Biaya

Komponen Biaya Pengolahan Air Asam Tambang	Nominal (Rupiah/satuan)
Biaya Pemompaan	Rp 1.229.292/jam
Biaya Perawatan KPL	Rp 653,95 /m ³
Biaya Modal	Rp 388.904/jam

(Sumber : Yusuf dkk.,2017)

Dengan total volume PRBs yang dibutuhkan sebesar 12.536 m³ di semua kompartemen, maka total material ZVI yang dibutuhkan adalah sebesar :

$$Total\ MMW - ZVI = \frac{Total\ Volume\ PRBs}{Volume\ PRBs\ per\ 1\ ton\ MMW - ZVI}$$

$$Total\ MMW - ZVI = \frac{12.536\ m^3}{448,75\ m^3/ton}$$

$$Total\ MMW - ZVI = 27,94\ ton$$

Sampel Zeolit (karbon aktif dengan sumber *fly ash*), *ZeroValent Iron* (sumber dari campuran *iron waste* dengan limbah sabut kelapa) akan digunakan rasio masing-masing 1:2:2 seperti pertimbangan sebelumnya. Menurut referensi dari Immacolata dkk., (2013), biaya media reaktif memberikan sumbangan paling besar dalam biaya yaitu sekitar 70%. Karena media reaktif PRBs yang dibuat pada penelitian ini digunakan beberapa *waste* dari limbah pertambangan, konstruksi MMW-ZVI PRBs bisa menghasilkan tingkat keekonomian yang lebih murah dan

Tabel-12. Debit Rata-Rata dalam 5 (lima) Bulan pada Pit1 Timur Banko Barat

Bulan	Debit Rata- rata (m ³ /jam)
September(2018)	134,00
Oktober(2018)	92,50
November(2018)	323,17
Desember(2018)	456,60
Januari(2019)	495,20
Rata-rata	300,29

(Sumber : Yusuf dkk.,2017)

Tabel-13. Analisis Biaya PRBs

	Jumlah yang Digunakan	Harga per Unit	Biaya (USD) / Biaya (USD) Setara September 2021	Referensi
ZVI-Partikel Mikro (<300 microns)	27.940 Kg	0.009 USD/Kg	207 USD	Maria Harja dkk, 2012
Karbon teraktiva i Biowaste	13.970 Kg	0.069 USD/Kg	793.5 USD	Maria Harja dkk, 2012
Tanah Lempung	13.970 Kg	0.2 USD/Kg	2794	The Interstate Technology & Regulatory Council (2011)
Monitoring dan Maintenance	7 Kompartemen	76,416 USD/ Kompartemen	534,9	Battelle Memorial Institute (2012)
Tahap Instalasi dan Pemasangan	7 Kompartemen	122,87 USD/ Kompartemen	860,09	Battelle Memorial Institute (2012)
Total Biaya PRBs untuk Pengelolaan Air Asam Tambang di <i>sump</i> Pit-1 Timur Bank selama 1 tahun operasi			5189,5 USD	

terjangkau. Dengan asumsi 1 (satu) tahun operasi, dan beberapa referensi lainnya, didapatkan perkiraan biaya operasi pengelolaan air asam tambang menggunakan MMW-ZVI PRBs pada tabel-13.

Didapatkan hasil analisis biaya pengelolaan air asam tambang menggunakan MMW-ZVI PRBs yang sudah diolah selama per bulannya adalah sebesar 5189.5 USD. Dengan menggunakan nilai konversi uang per September 2021 sebesar Rp 14.320,95, maka total biaya yang dibutuhkan adalah sebesar Rp 74.318.570,03

Pada hasil biaya pengelolaan air asam tambang di *sump* Pit 1 Timur Banko Barat menggunakan metode konvensional, didapatkan sebesar Rp 6.356,85/m³ pada seluruh total volume kompartemen. Biaya tersebut adalah biaya yang harus dikeluarkan setiap bulannya, karena perhitungan biaya sampai debit dilakukan dengan menggunakan nominal rata-rata per bulannya. Oleh karena itu, biaya total untuk mengelola air asam tambang dengan total seluruh volume kompartemen *sump* Pit 1 Timur Bank Timur adalah :

Biaya Metode Konvensional = Biaya per $m^3 \times$ Total Volume Kompartemen

Biaya Metode Konvensional = Rp 6.356,85/ $m^3 \times$ 12.536 m^3

Biaya Metode Konvensional = Rp 79.689.471,6/bulan

Dari hasil analisis biaya pengelolaan air asam tambang di *sump* Pit Timur Banko Barat dengan metode konvensional dan dengan menggunakan MMW-ZVI PRBs, didapatkan perbandingan yang tidak terlalu signifikan perbedaannya. Hal ini dikarenakan belum ada penelitian yang mendalam dan komprehensif mengenai analisis keekonomian untuk penggunaan PRBs dalam mengelola air asam tambang di permukaan khususnya di Indonesia. Namun, biaya pengelolaan air asam tambang menggunakan metode konvensional seperti yang diterapkan di *sump* Pit Timur Banko Barat berlaku untuk setiap bulan pengelolaan, sedangkan menurut referensi yang kami acu, pengelolaan dengan PRBs dapat berlangsung selama bertahun-tahun selama dilakukan *maintenance* dan penggantian media reaktif sehingga biaya yang dikeluarkan akan jauh lebih murah dari metode konvensional.

KESIMPULAN

1. Dari hasil pembahasan sebelumnya, teknologi *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) sangat potensial untuk remediasi berbagai macam unsur kontaminan logam berat yang terkandung dalam air asam tambang secara efisien dalam jangka waktu yang panjang.
2. Dari hasil pembahasan sebelumnya juga, teknologi *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) juga cenderung memiliki biaya yang lebih murah daripada metode konvensional dalam mengelola air asam tambang batubara atau mineral di Indonesia
3. Pada penelitian masa mendatang, diperlukan penelitian yang lebih luas dalam kondisi lapangan pada skala komersial untuk jangka waktu yang lebih lama. Penelitian harus difokuskan pada fisiologis dan biokimia untuk optimalisasi proses dan pembuatan skala besar/pilot plant pada penerapan aplikasi PRBs dalam skala tambang. Perlu juga dikembangkan mengenai bahan-bahan pembuat PRBs khususnya untuk media reaktif sendiri serta penelitian untuk unsur kontaminan logam berat lainnya.
4. *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) dengan menggunakan media reaktif dari *waste* penambangan adalah inovasi yang dapat digunakan oleh para perusahaan tambang, khususnya tambang mineral dan batubara untuk mengelola air asam tambang dengan cara yang lebih efektif, efisien, hemat dan bisa menjadi langkah untuk mendukung prinsip *zero waste* di sektor pertambangan di Indonesia.
5. *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) mampu menjadi solusi untuk diterapkan di Indonesia secara masif untuk memaksimalkan pengelolaan air asam tambang melalui proses yang efektif, ekonomis dan ramah lingkungan. Kedepannya, diperlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam penerapan *Permeable Reactive Barriers* (PRBs) ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada berbagai pihak karena kami dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah berjudul “*Permeable Reactive Barrier* sebagai

Inovasi Remediasi Air Asam Tambang yang Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan di Indonesia” terutama kepada dosen pembimbing kami yaitu Prof.Dr.Ir.Rudy Sayoga Gautama, teman-teman dari program studi Teknik Pertambangan ITB dan seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung.

Kami menyadari bahwa di dalam penyusunan laporan ini masih terdapat berbagai kekurangan. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan saran dan kritik dari berbagai pihak demi semakin sempurnanya laporan ini. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih sekali lagi kepada panitia lombaKSMC (Kalimantan Student Mining Competition) karena telah memberi kesempatan kami untuk mengikuti salah satu wadah yang berharga ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdul Karim Shah, Zeenat Muhammad Ali, Abdul Jabbar Laghari, dan Syed Farman Ali Shah 2013. Utilization of Fly Ash as Low-Cost Adsorbent for the Treat. ISSN: 2319-9873
- [2] Ahmed Hamdy. 2020. Experimental Study of the Relationship Between Dissolved Iron, Turbidity, and Removal of Cu(II) Ion From Aqueous Solutions Using Zero-Valent Iron Nanoparticles. Arabian Science for Science and Engineering. Arab.
- [3] Alejandro Briso. 2017. *Treatment of acidic mine drainage in an adsorption process using calcium silicate modified with Fe(III)*. Vol 10.1016/j.hydrmet.2017.06.016.
- [4] Aprilia Pangestut, Isnaini Nur Utami, Murni Dwi Lestari dan Rahmatul Farikhah . 2017. *Pemanfaatan Sabut Kelapa Menjadi Pot Cantik*.
- [5] Ayanda N. Shabalala dan Stephen O . 2017. *Pervious Concrete Reactive Barrier for Removal of Heavy Metals from Acid Mine Drainage*. Journal of Hazardous Materials. Volume 323, Part B, 5 February 2017, Pages 641-653.
- [6] Battelle Memorial Institute March. 2012. *Permeable Reactive Barrier Cost and Performance Report* . Vol TR-NAVAC-ESC-EV-1207.
- [7] Claire.co.uk. PRBs untuk Remediasi Air Tanah. Diakses pada 25 September 2021
- [8] D. Kołodyńska¹ , M. Kozioł dan L. V. Pylypchuk. 2017. *Investigations of Heavy Metal Ion Sorption Using Nanocomposites of Iron-Modified Biochar*. Kołodyńska et al. Nanoscale Research Letters (2017)12:433 DOI 10.1186/s11671-017-2201.
- [9] Eneng Maryani. 2021. *Potensi Pemanfaatan Red Mud di Indonesia Dalam Bidang Keramik*.
- [10] Hafiz Badaruddin Ahmad, Yasir Abbas, Mazhar Hussain, Naeem Akhtar, Tariq Mahmood Ansari, Muhammad Zuber, Khalid Mahmood Zia, and Shafiq Ahmad Arain. 2014. *Synthesis and Application of Alumina Supported Nano Zero Valent*

- Zinc as Adsorbent for the Removal of Arsenic and Nitrate*. Chem. Eng., 31(2), 284-288. Korean.
- [11] <http://www.apbi-icma.org>. *Fly Ash Batubara*. Diakses pada 25 September 2021.
- [12] <https://www.thespruce.com/understanding-and-improving-clay-soil>. *Clay Soil*. Diakses pada 25 September 2021
- [13] Imma Bortone, Simeone Chianese, Armando Di Nardo dan Michele Di Natale. 2012. *Groundwater Protection by Permeable Adsorbing Barriers at Solid Waste Landfills*. ISBN: 978-1-62257-121-5. Nova Science Publishers, Inc.
- [14] Januarti Jaya Ekaputri, M. Shahib Al Bari. 2012. *Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara*. vol 26i2.30762.
- [15] Jevita Andini J.Ginting, Agus Setyo Budi, dan Esmar Budi. 2012. *Penggunaan Membran Keramik Berbasis Zeolit dan Clay dengan Karbon Aktif Sebagai Aditif Untuk Penurunan Kadar Fe dan Mn pada Air Tanah Daerah Bekasi*. Seminar Nasional Fisika 2012 Jakarta, 9 Juni 2012.
- [16] Jiwei Liu, Teza Mwamulima, Yongmei Wang, Yi Fanga Shaoxi dan Song Changheng Penga. 2017. *Removal of Pb(II) and Cr(VI) from Aqueous Solutions Using the Fly Ash Based Adsorbent Material-Supported Zero-Valent Iron*. Journal of Molecular Liquids. Volume 243, October 2017, Pages 205-211
- [17] Kusno Isnugroho dan David C Birawidha. 2015. *Pemanfaatan Limbah Crushing Plant untuk Pembuatan Pig Iron Menggunakan Hot Blast Cupolayang Diinjeksikan Serbuk Arang Kayu. Unit Pelaksana Teknis*. Balai Pengolahan Mineral Lampung
- [18] M Mahidin, T N Sulaiman, A Muslim dan A Gani. 2016. *Removal of Mn(II) from the acid mine wastewaters using coal fired bottom ash*. 29th Symposium of Malaysian Chemical Engineers (SOMChE) 2016 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering .Vol 10.1088/1757-899X/206/1/012095.
- [19] Maria Harja, Gabriela Buema, Daniel Mircea Sutiman, Corneliu Munteanu, dan Daniel Bucur. 2012. *Low Cost Adsorbents Obtained From Ash For Copper Removal*. Chem. Eng., 29(12), 1735-1744 (2012) DOI: 10.1007/s11814-012-0087.
- [20] Nusa Idaman Said. 2014. *Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara "Alternatif Pemilihan Teknologi"*. Journal of Molecular Liquids. JAI Vol.7 No. 2, 2014.
- [21] Prabu Deivasigamani, Rangasamy Parthiban dan Paharika Saikia. 2015. *Adsorption of Copper Ions Onto Nano-Scale Zero-Valent Iron Impregnated Cashew Nut Shell*. Chem. Eng., 29(12), 1735-1744 (2012) DOI: 10.1007/s11814-012-0087. Korean.
- [22] Regulatory Council PRB. 2011. *Permeable Reactive Barrier Technology Update*. Vol. 1. Ed.2.
- [23] Safitri. E., Djumari. 2009. *Kajin Teknis dan Ekonomis Pemanfaatan Limbah Batubara (fly ash) Pada Produksi Paving Block*. Media Teknik Sipil ISSN 1412-0976, Surakarta.
- [24] Semanticscholar.org. *Iron Powder Waste*. Diakses pada 25 September 2021
- [25] Seongchul Ryu, Gayathri Naidu, Hee Moon dan Saravanamuthu Vigneswaran. 2020. *Selective Copper Recovery by Membrane Distillation and Adsorption System from Synthetic Acid Mine Drainage*. Chem. Eng., 29(12), Chemosphere 260 2020: 127528.
- [26] Timlo.net. *Limbah Sabut Kelapa*. Diakses pada 25 September 2021
- [27] Ximena Castilloa, Jaime Pizarroa, Claudia Ortizb, Héctor Cidb, Marcos Florese, Els De Canckd dan Pascal Van Der Voortd. 2018. *A Cheap Mesoporous Silica from Fly Ash as an Outstanding Adsorbent For Sulfate in Water*. Vol 1387-1811. Published by Elsevier In
- [28] Abfertiawan, M.S. *Model Transpor Air Asam Tambang Melalui Pendekatan Daerah Tangkapan Air*. 2016. Disertasi Doktor. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

