

**PENGELOLAAN AIR ASAM TAMBANG (AAT) DARI DINDING BEKAS
PENAMBANGAN SEBAGAI ALTERNATIF PENANGGULANGAN
PENCEMARAN LINGKUNGAN: STUDI KASUS TAMBANG BATU HIJAU,
NUSA TENGGARA BARAT**

***ACID MINE DRAINAGE (AMD) MANAGEMENT OF MINE WALLS AS AN ALTERNATIVE OF
ENVIRONMENTAL POLLUTION CONTROL: A CASE STUDY OF BATU HIJAU MINE, WEST
NUSA TENGGARA***

Muhammad Suryadi¹, Ginting Jalu Kusuma²

Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha No. 10, Bandung
Email: msuryadi521@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mencegah terjadinya pencemaran air karena kegiatan penambangan. Tulisan ini menunjukkan dan membuktikan bahwa dinding tambang merupakan sumber penghasil air asam terbesar setelah kegiatan penambangan selesai. Kegiatan pembukaan lahan yang menyentuh batuan yang mengandung mineral sulfida berpotensi menghasilkan air yang bersifat asam. Air asam ini dapat mencemari lingkungan apabila mengalir ke perairan. Air asam tambang yang dihasilkan dari dinding tambang memiliki kontribusi yang paling besar dalam pencemaran lingkungan apabila tidak dikendalikan. Air yang keluar dari lokasi penambangan harus selalu memenuhi baku mutu kualitas air yang telah ditetapkan pada saat kegiatan penambangan masih berlangsung dan setelah kegiatan penambangan berakhir. Limpasan air asam dari dinding tambang ke lingkungan akan menimbulkan masalah lingkungan serius antara lain hilangnya biota air yang sensitif terhadap keasaman sehingga akan mengganggu rantai makanan yang ada. Oleh sebab itu, perlu dilakukan upaya antisipatif sebelum hal itu terjadi. Upaya inilah yang akan ditunjukkan dari hasil penelitian ini. Lokasi penelitian dipilih di Tambang Batu Hijau, Nusa Tenggara Barat dengan pertimbangan bahwa lokasi tersebut merupakan tambang terbuka terbesar di Indonesia yang 80% dinding tambangnya menghasilkan air asam. Langkah awal penelitian ini adalah menghitung besarnya potensi air asam yang dihasilkan setelah penambangan selesai dengan menggunakan metode sampling. Setelah itu, akan dilakukan upaya pencegahan agar air asam yang dihasilkan tersebut tidak melimpah dan mengalir ke lingkungan yang dapat mencemari perairan. Dari hasil penelitian diperoleh dua metode pengelolaan untuk mencegah agar air asam yang dihasilkan tersebut tidak melimpah dan mengalir ke lingkungan. Metode pencegahan terdiri atas dua, yaitu metode statis (pasif) dan dinamik (aktif). Hasil penelitian membuktikan bahwa kedua metode ini efektif untuk mengendalikan air asam tambang dan dapat dijadikan alternatif pencegahan dan penanggulangan pencemaran lingkungan dari bekas kegiatan penambangan.

Kata Kunci: air asam tambang, pengendalian, pengelolaan, pencemaran lingkungan

ABSTRACT

The research aims to prevent water pollution from mining activities. This paper aims to show and prove that the mine walls are the largest source of acid water after mining activities are done. Land clearing activities that touch rocks containing sulfide minerals have the potential to produce acidic water. This acidic water can pollute the environment when it flows into the waters. Acid mine drainage (AMD) produced from mine walls has the greatest contribution to environmental pollution if not controlled. The water that comes out of the mining location must always meet the water quality standards that have been set at the time the mining activity is still going on and after the mining activity ends. Acid water runoff from the mine walls to the environment will cause serious environmental problems, such as the loss of water biota that is sensitive to acidity which will disrupt the existing food chain. Therefore, anticipatory efforts need to be taken before that environmental problem happens. The efforts will be shown from this this research results. The research location chosen is Batu Hijau Mine, West Nusa Tenggara with the consideration that it is the largest open mine in Indonesia with which the 80% of mine walls produce acidic water. The initial step of this research is calculating the potential amount of acidic water produced after mining activities are done, by using the sampling method. Hereinafter, prevention efforts will be taken so the acidic water produced is not abundant

and doesn't flow into the environment which can pollute the waters. The research results show there are two management methods to prevent the acidic water from being abundant and flowing into the environment. The methods are static method (passive) and dynamic method (active). The research results prove that the abovementioned methods are effective in controlling acid mine drainage and can be used as an alternative prevention and control of environmental pollution from post mining activities.

Keywords: acid mine drainage (AMD), control, management, environmental pollution.

PENDAHULUAN

Air Asam Tambang (selanjutnya akan disingkat AAT) merupakan salah satu dampak negatif yang ditimbulkan oleh kegiatan penambangan karena dapat merusak lingkungan. Dengan demikian, air asam tambang penting untuk dikelola dengan baik terlebih pada kegiatan penambangan di daerah yang mempunyai curah hujan tinggi. Kondisi ini, terutama terjadi hampir di semua kegiatan penambangan di Indonesia. Air dari sumber mana pun yang terdapat di lokasi penambangan adalah sesuatu yang harus diperhitungkan dan diperhatikan dengan baik keberadaannya. Air dapat berperan sebagai reactant (pereaksi) dan media bakteri dalam proses oksidasi pembentukan AAT (Ferguson et al., 1988:6). Potensi AAT dapat berasal dari beberapa sumber yang merupakan hasil kegiatan penambangan, antara lain: (1) penimbunan (bijih/ore, medium/low-grade, limbah batuan/waste), (2) batuan sisa pemrosesan (tailing), dan (3) daerah terbuka dan dinding tambang (pitwall). Tulisan ini akan mengkhususkan pada AAT dari dinding tambang (pitwall). Alasan pemilihan ini akan dijelaskan di bawah ini.

Selama ini tidak banyak ditemukan penelitian yang membahas secara khusus mengenai AAT yang berasal dari dinding tambang. Pada umumnya penelitian AAT dari dinding tambang diteliti bersamaan dengan AAT yang ada di dasar tambang (pit lake). Artinya, pembahasan AAT dari dinding tambang merupakan bagian dari fenomena AAT di pit lake (dasar tambang) saja. Alasan lain, bahwa

pengelolaan sumber penghasil asam yang berasal dari dinding tambang (pitwall) secara umum lebih sulit dibandingkan dengan mengelola timbunan batuan dan tailing (batuan sisa pemrosesan). Timbunan batuan dapat dicegah dengan penutupan (covering) menggunakan berbagai metode, misalnya: plastik/HDPE, tanah penutup, batuan NAP (non acid performing) dan sebagainya. Sementara itu, batuan sisa pemrosesan (tailing) dapat dicegah dengan penutupan menggunakan air (wet covering), baik di darat (danau/dam) ataupun di laut (deep sea tailing). Lain halnya pengelolaan dinding tambang (pitwall) yang akan terekspos/terbuka secara terus-menerus setelah kegiatan penambangan selesai. Suatu keniscayaan (secara teknologi) dan memerlukan biaya yang sangat besar, misalnya menutupi dinding tambang dengan plastik/HDPE atau misalnya melapisi dengan batuan NAP atau top soil. Dengan demikian, diperlukan suatu perhitungan yang matang mengenai potensi air asam yang dapat dihasilkan dari dinding tambang sehingga di kemudian hari ketika penambangan selesai, tidak akan menimbulkan dampak negatif.

Pemilihan teknologi atau metode yang tepat dan ekonomis untuk mengelola air asam yang dihasilkan, perlu dipikirkan dan diupayakan. Hal ini disebabkan lindian air asam dari dinding tambang akan terjadi secara terus-menerus baik pada saat hujan maupun saat cuaca panas (proses pelapukan kimiawi) dan membutuhkan waktu yang sangat lama sampai terbentuk pit

lake (danau tambang). Apabila terjadi kebocoran/limpasan air asam dari dinding tambang ke lingkungan maka akan menimbulkan masalah lingkungan serius. Misalnya hilangnya biota air yang sensitif terhadap keasaman sehingga akan mengganggu rantai makanan yang ada. Dengan demikian, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan.

Karakterisasi air asam dari dinding tambang sangat penting diketahui terutama untuk penambangan skala besar dan secara geokimia sebagian besar dinding tambangnya pada saat mencapai pit limit tergolong batuan Potential Acid Forming (PAF). Apabila karakterisasi air asam dinding tambang tidak diketahui, akan mengalami kesulitan dalam pengelolaan air asam di pit lake. Kesulitan lain akan muncul pada saat kegiatan penutupan tambang. Hal ini dapat menyebabkan program pengelolaan AAT mengalami kesulitan teknis untuk menentukan program pengelolaan yang efektif. Oleh sebab itu, pemetaan air asam dinding tambang perlu diketahui lebih awal untuk diproyeksikan ke kondisi dinding tambang pada saat penutupan tambang (mine closure).

Dalam hal ini sangat penting diketahui karakterisasi dinding tambang, yaitu yang berhubungan dengan: penggolongan dan sebaran batuan dinding tambang (PAF atau Non Acid Forming/NAF), litologi batuan dinding tambang, kualitas AAT dari tiap litologi yang dominan, dan prakiraan kuantitas air asam dinding tambang per intensitas hujan. Pengujian dilakukan secara langsung dan skala laboratorium sehingga dapat dibandingkan setiap karakterisasinya.

Air asam dinding tambang memang tidak termasuk hal yang kritikal dibandingkan dengan air asam yang berasal dari waste rock dumps (timbunan batuan sisa -tidak terdapat mineral

berharga-) dan tailings impoundments (dam penampung batuan sisa pemrosesan). Morin (1900) menjelaskan bahwa dampak air asam dinding tambang menjadi lebih buruk setelah kegiatan penambangan selesai atau menjelang kegiatan penutupan tambang (mine closure). Justru hal inilah yang akan membahayakan lingkungan karena ketika penambangan selesai, dampak negatifnya baru akan terjadi. Lebih jauh Morin menambahkan bahwa terdapat dua sumber air yang menyebabkan air asam dinding tambang perlu mendapatkan perhatian, yaitu: air tanah dan air permukaan walaupun keduanya bergantung pada kondisi hidrogeologi lokasi penambangan.

Dari beberapa hasil penelitian menunjukkan betapa besar potensi air asam yang dapat dihasilkan dari dinding tambang. Hal ini ditunjukkan oleh simpulan dari penelitian Morin, A Kevin (1990) yang menyimpulkan bahwa dinding tambang berukuran luas (11–240) x 106 m² dapat menghasilkan keasaman total (sulfat) antara (2-20) x 109 mgSO₄ per minggu. Simpulan ini juga didukung oleh hasil penelitian lain dari Morin, A Kevin and Hutt, M. Nora (2004) yang menunjukkan jika terjadi pembilasan dinding tambang selama 4-8 minggu maka akan menghasilkan keasaman total 140-5.250 mgSO₄ per m² permukaan batuan setiap minggu. Tidak berbeda dengan dua di atas, Morth et.al. (1972) dalam Morin (2004) menunjukkan bahwa AAT dari dinding tambang menghasilkan sekitar 20-35% air asam dari keseluruhan permukaan reaktif tambang dan 60-85% dari AAT dinding tambang akan dilepaskan pada saat dinding tambang mulai tergenang (pit lakes). Dapat dibayangkan AAT yang akan dihasilkan dari bekas penambangan yang sangat luas.

Tambang Batu Hijau, Nusa

Tenggara Barat dengan single pit mempunyai luas dinding tambang 3.7 juta m² (diameter 2000 m dan kedalaman 600 meter). Apabila setiap m² dinding tambang dapat menghasilkan 8.3 mg SO₄/liter per hari dan dengan asumsi permukaan dinding tambang mengalami pelindian sempurna dan litologi homogen maka akan dihasilkan 30,71 kg SO₄ per liter air lindian setiap hari. Suatu jumlah yang tergolong sangat besar dan tentu saja memerlukan pengelolaan yang serius agar terhindar dari pencemaran lingkungan pada saat terjadi kebocoran atau limpasan air asam ke lingkungan.

Waktu tunggu (lag-time) terjadinya aliran air asam dikendalikan oleh konsentrasi dan reaktivitas dari ferro sulphide serta ketersediaan mineral karbonat (Tremblay et al, 2000). Asam sulfat dapat terbentuk dan dilepaskan oleh sisa sulfur yang tinggi dengan sedikit mineral karbonat dalam waktu beberapa hari setelah batuan terbuka yang bersentuhan dengan udara dan air. Sisa sulfur yang rendah (<2%) dengan beberapa mineral karbonat kemungkinan tidak akan melepaskan asam untuk beberapa tahun atau dekade. Dengan demikian, sangat penting mengetahui jumlah sulfur yang terdapat dalam batuan untuk memperkirakan potensi AAT.

Dengan demikian, penelitian dilakukan untuk mengetahui karakterisasi AAT dinding tambang dalam hal potensi dan kualitas air asam yang dihasilkannya. Dengan begitu, dapat direncanakan dan diupayakan pengelolaannya supaya tidak terjadi dampak negatif yang akan mengganggu dan mengancam lingkungan. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui karakterisasi kualitas air lindian hasil pengukuran lapangan di setiap spot penelitian dan hasil analisis laboratorium pada beberapa litologi batuan yang melingkupi (dominan) dinding tambang Batu Hijau, Nusa

Tenggara Barat. Diharapkan hasil penelitian dapat digunakan di semua bekas kegiatan penambangan agar dapat terjaga stabilitas lingkungan setelah eksploitasi penambangan.

METODE

Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah teknik sampling, yaitu teknik pengambilan sampel dari lokasi penelitian. Pengertian teknik sampling menurut Margono (2004) adalah cara untuk menentukan sampel yang jumlahnya sesuai dengan ukuran sampel yang akan dijadikan sumber data sebenarnya dengan memperhatikan sifat-sifat dan penyebaran populasi agar diperoleh sampel yang representatif. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menentukan populasi untuk mendapatkan data yang akurat sehingga sampel representatif untuk diteliti. Hal ini dilakukan dengan melihat kondisi litologi batuan yang terdiri atas empat jenis dominan, yaitu: (1) vulkanik, (2) diorite, (3) intermediete tonalite, (4) young tonalite

Pengolahan data parameter kualitas air dari hasil lindian di spot penelitian akan disajikan dalam bentuk grafik atau secara statistik dengan membandingkan beberapa parameter kualitas air dari hasil uji laboratorium (uji kualitas air lindian dari batuan contoh) dan pengukuran langsung (insitu) setiap hari yang diambil dari spot penelitian. Parameter utama yang akan dibandingkan adalah: pH, paste pH, alkalinity, acidity, konsentrasi sulfat, conductivity, TDS, TSS, dissolved oxygen, logam terlarut: Fe, Cu, Zn, Pb dan Mn serta ferrous/ferric ratio. Penentuan logam terlarut yang akan dibandingkan berdasarkan pada hasil pemantauan yang selama ini sudah dan terus dilakukan oleh perusahaan, yaitu terpusat pada logam-logam yang secara

nyata selalu terdapat pada AAT dengan fluktuasi konsentrasi yang signifikan.

Pengolahan dan analisis data dari hasil uji laboratorium terhadap contoh batuan, yaitu dengan melakukan simulasi menggunakan software PHREEQC metode inverse modelling. Tujuannya untuk mengetahui reaksi geokimia yang terjadi selama pelindian contoh batuan. Sedangkan metode forward modelling untuk memverifikasi kualitas air lindian hasil simulasi inverse modelling (Delita E.A., 2017).

Uji mineralogi akan mendeskripsikan mineral-mineral pembentuk batuan. Hal ini sangat berguna untuk mengelompokkan contoh batuan dari dinding tambang sesuai jenis mineral yang sama. Setiap mineral yang bersentuhan dengan udara dan air secara menerus dan adanya peran bakteri sebagai katalis, maka mineral tersebut dapat terlarut (pelindian). Setiap mineral mempunyai ikatan kimia yang berbeda untuk dapat diuraikan oleh reaktan (air, udara dan bakteri). Apabila mineral mulai terlarut (terlindian), maka diindikasikan bahwa batuan tersebut mulai mengalami pelapukan. Dari hasil analisis parameter kualitas air lindian, jika terjadi perubahan kenaikan konsentrasi secara drastis dari sulfat atau beberapa logam terlarut, maka dapat diindikasikan bahwa batuan dinding tambang di spot penelitian mulai mengalami pelapukan. Perlu dicatat kapan waktu air lindian tersebut diambil (saat pengambilan contoh air lindian atau pembilasan spot penelitian), yang selanjutnya dicek kesesuaiannya dengan pengelompokkan mineral-mineral berdasarkan kecepatan pelapukannya.

Interpretasi hasil uji statik berdasarkan nilai Net NP atau rasio NP:AP pada kondisi saat penelitian dilakukan. Jika rasio NP:AP <1 maka potensi air asam tinggi, jika rasio NP:AP >4 maka potensi air asam rendah. Dan

apabila rasio NP÷AP berada diantara 1 dan 4, maka uji kinetik perlu dilakukan (Price et al., 1995). Untuk menghitung potensi pembentukan asam dari hasil uji laboratorium digunakan persamaan sebagai berikut:

Acid Potential (AP) = (% Stotal) x 31.25 (kg as CaCO₃/t)

Sulphide Acid Potential (SAP) = (% Ssulphide) x 31.25 (kg as CaCO₃/t)

Neutralization Potential (NP) = standar ABA (kg as CaCO₃/t)

Carbonate Neutralization Potential (CNP) = (%CO₂ - inorganic) x 22.73 atau (%Cinorganic)x 83.33 (kg CaCO₃/t)

Nilai AP, SAP, NP dan CNP dihasilkan dan dihitung berdasarkan uji laboratorium, maka potensi pembentuk asam dapat diinterpretasikan dengan mengetahui:

Net Neutralization Potential (NNP) = NP – AP (kg as CaCO₃/t)

Neutralization Potential Ratio (NPR) = NP / AP

Refined Net Neutralization Potential (RNNP) = NP – SAP (kg as CaCO₃/t)

Refined Neutralization Potential Ratio (RNPR) = NP / SAP

Carbonate-Sulphide Net Neutralization Potential (CNNP) = CNP – SAP (kg as CaCO₃/t)

Carbonate-Sulphide Net Neutralization Potential Ratio (CNPR) = CNP / SAP

Dengan mengetahui nilai CNPR maka dapat diinterpretasikan potensi pembentukan air asam tambang, yaitu direpresentasikan oleh perbandingan antara carbonate dan sulphide dari contoh batuan.

Interpretasi hasil uji kinetik pada prinsipnya adalah menghitung mineral sulfida yang teroksidasi dan kecepatan pengurangan NP. Dengan diketahuinya nilai awal AP dan NP maka kecepatan pengurangan dan waktu yang diperlukan

untuk menurunkan produksi asam dan netralisasi mineral di dinding tambang dapat dihitung (Lapakko, 1987, 1900; Bradham and Carrucio, 1990; White and Jeffers, 1994 and White et al 1994 and Mend Project 1.16.4, 1995). Pembentukan asam dan netralisasi mineral mempunyai komposisi bermacam-macam dan reaktivitas yang relatif satu sama lain. Netralisasi dengan mineral yang berbeda akan menghasilkan kecepatan pengurangan NP yang berbeda pula.

Dari hasil uji kualitas air lindian spot penelitian dapat diketahui nilai dari parameter kualitas air yang diukur secara langsung (insitu) atau hasil uji laboratorium. Parameter kualitas air lindian spot penelitian dan parameter kualitas air dari hasil uji kinetik akan dibandingkan hal ini agar dapat menjawab pertanyaan yang menjadi tujuan penelitian.

Tujuan interpretasi dari hasil uji mineralogi dengan x-ray diffraction (XRD), yaitu agar dapat mengetahui jenis-jenis mineral yang terdapat pada contoh batuan. Mengetahui mineralogi dari litologi batuan dari dinding tambang adalah sangat penting dalam menentukan dan menginterpretasikan hasil analisis data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan di lokasi tambang Batu Hijau PT Amman Mineral Nusa Tenggara (AMNT) yang terletak di bagian Barat Daya Pulau Sumbawa, tepatnya pada Kabupaten Sumbawa Barat – Provinsi Nusa Tenggara Barat, pada posisi geografis 116,40°BT–116,55°BT dan 8,50°LS-9,05°LS. Kegiatan pertambangan tembaga-emas di Tambang Batu Hijau saat ini dioperasikan oleh PT AMNT yang telah berganti nama dari PT Newmont Nusa Tenggara pada bulan November 2016.

Kegiatan eksplorasi dilakukan setelah penandatanganan kontrak karya pada bulan Desember 1986. Ini disebabkan karena telah ditemukan cebakan tembaga-emas (Cu-Au) porfiri di daerah Batu Hijau dan persetujuan oleh Pemerintah Republik Indonesia untuk pengembangan tambang Batu Hijau diterbitkan pada tahun 1996. Pekerjaan konstruksi dimulai pada tahun 1997. Dua tahun kemudian, tepatnya pada bulan Oktober 1999 adalah produksi pertama konsentrat tembaga. Tahap operasi produksi dimulai pada tanggal 1 Maret 2000 untuk masa 30 tahun sesuai dengan Surat Keputusan Direktur Jenderal Pertambangan Umum dengan Nomor 148.K/20.01/DJP/2000 tanggal 28 April 2000. Status Kontrak Karya diubah menjadi Izin Usaha Pertambangan Khusus Operasi Produksi berdasarkan Surat Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 414K/30/MEM/2017 tertanggal 10 Februari 2017 (Sumber: PT AMNT RPT, 2019)

Perjalanan ke lokasi tambang Batu Hijau relatif mudah dan tersedia sarana transportasi yang sangat memadai. Untuk sampai di sana dapat menggunakan pesawat dari Jakarta menuju Bandara Internasional Lombok di Praya (Lombok) dan dilanjutkan menggunakan sea plane atau helikopter selama 15 menit ke Pelabuhan Benete yang merupakan pelabuhan yang dioperasikan oleh perusahaan. Alternatif lain bisa ditempuh dari Bandara Internasional Lombok melalui jalan darat menuju Pelabuhan Kayangan dengan waktu tempuh 2 jam kemudian dilanjutkan dengan perjalanan laut menggunakan speed boat selama ± 1,5 jam menuju Pelabuhan Benete yang merupakan pelabuhan PT AMNT. Lokasi tambang Batu Hijau sendiri berjarak 25 km dari Pelabuhan Benete dan ditempuh dengan jalan darat selama ± 45 menit (Sumber: PTAMNT RPT, 2019)



Gambar 1: Lokasi Kegiatan Tambang Batu Hijau

Lokasi tambang terletak di Kabupaten Sumbawa Barat - Provinsi Nusa Tenggara Barat dengan posisi geografis: 116.40 derajat BT s.d. 116.55 derajat BT dan 8.50 derajat LS s.d. 9.05 derajat LS. Luas wilayah penambangan 40.732 Ha

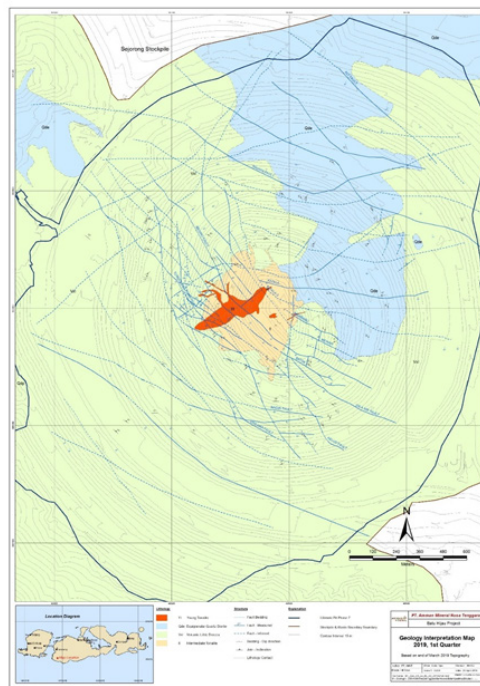
Lokasi penambangan terletak di antara 3 kecamatan, yaitu (1) Kecamatan Maluku, (2) Kecamatan Sekongkang, dan (3) Kecamatan Jereweh. Kabupaten Sumbawa Barat merupakan salah satu kabupaten yang berada di Provinsi Nusa Tenggara Barat yang terletak di Pulau Sumbawa. Kabupaten Sumbawa Barat merupakan kabupaten yang baru terbentuk pada tahun 2004 yang merupakan pemekaran dari kabupaten Sumbawa. Di sanalah tambang Batu Hijau berada. Tambang Batu Hijau mempunyai kapasitas produksi (ore mill) saat ini sekitar 120 ribu ton per hari, sedangkan material move berkisar antara 425–450 ribu ton per hari (2018). Tambang Batu Hijau merupakan tambang single pit dengan luas areal bukaan lubang tambang 520,55 ha (RPT-2019). Lokasi penambangan terletak di antara 3 kecamatan, yaitu (1) Kecamatan Maluku, (2) Kecamatan Sekongkang, dan (3) Kecamatan Jereweh. Kabupaten Sumbawa Barat merupakan salah satu kabupaten yang berada di Provinsi Nusa Tenggara Barat yang terletak di Pulau Sumbawa. Kabupaten Sumbawa Barat merupakan kabupaten yang baru terbentuk pada tahun 2004 yang merupakan pemekaran dari kabupaten Sumbawa. Di sanalah tambang Batu Hijau berada. Tambang Batu Hijau mempunyai kapasitas produksi (ore mill) saat ini sekitar 120 ribu ton per hari, sedangkan material move berkisar antara 425–450 ribu ton per hari (2018). Tambang Batu Hijau merupakan tambang single pit dengan luas areal bukaan lubang tambang 520,55 ha (RPT-2019). (Sumber: PTAMNT RPT, 2019)



Gambar 2: Kondisi lubang tambang pada 18 Juli 2019.

Saat ini kegiatan penambangan masih berlangsung dan diperkirakan akan berakhir kegiatan penambangan pada tahun 2024. Geometri lubang tambang pada saat kegiatan penambangan berakhir akan memiliki garis tengah (kerucut terbalik) : 2.749 m dengan kedalaman 435 m.

(Sumber: PTAMNT, Juli 2019)



Gambar 3 : Kondisi litologi batuan yang akan terpapar di dinding tambang setelah kegiatan penambangan berakhir di tahun 2024. Lubang tambang akan terisi air secara alami dr air hujan, air larian permukaan dan air tanah. Diperkirakan air yang akan di tampung di lubang tambang sampai mencapai ketinggian 300 m dari permukaan laut.

Diperkirakan akan terdapat dinding tambang yang akan terpapar secara permanen setinggi 135 m. (Sumber: PTAMNT, Tahun 2019)



Gambar 4: Salah Satu Aliran Air Tanah Dari Pemboran Horizontal
(Sumber: PT AMMAN, Juli 2019)

Lokasi penambangan terletak di antara 3 kecamatan, yaitu (1) Kecamatan Maluk, (2) Kecamatan Sekongkang, dan (3) Kecamatan Jereweh. Kabupaten Sumbawa Barat merupakan salah satu kabupaten yang berada di Provinsi Nusa Tenggara Barat yang terletak di Pulau Sumbawa. Kabupaten Sumbawa Barat merupakan kabupaten yang baru terbentuk pada tahun 2004 yang merupakan pemekaran dari kabupaten Sumbawa. Di sanalah tambang Batu Hijau berada. Tambang Batu Hijau mempunyai kapasitas produksi (ore mill) saat ini sekitar 120 ribu ton per hari, sedangkan material move berkisar antara 425–450 ribu ton per hari (2018). Tambang Batu Hijau merupakan tambang single pit dengan luas areal bukaan lubang tambang 520,55 ha (RPT-2019) (gambar 1).

Lokasi lubang tambang sebelumnya merupakan perbukitan dengan pepohonan yang lebat dengan ketinggian sekitar 596 meter di atas permukaan laut. Kemajuan penambangan

di tambang Batu Hijau dibagi dalam beberapa fase penambangan. Fase 1 sampai dengan Fase 5 dilakukan sejak 1 Maret 2000 sampai dengan tahun 2013 dengan luas permukaan lubang tambang relatif masih kecil. Pada tahun 2014 terdapat 2 fase, yaitu Fase 6 dan Fase 7. Fase 7 merupakan tahap terakhir penambangan di Batu Hijau berdasarkan rencana tahun 2019. Penambangan Fase-7 akan terus dilakukan sampai bijih di Fase-7 habis tergali di tahun 2024. Diperkirakan garis tengah lubang tambang pada akhir kegiatan sekitar 2,4 km–3,1 km dengan kedalaman maksimum pada elevasi sekitar 435 m di bawah permukaan laut. Seluruh kegiatan penambangan di tambang Batu Hijau akan berakhir di 2024 sementara proses pengolahan bijih dari timbunan (stockpile) akan berlanjut hingga tahun 2037.

Dengan demikian, penelitian tentang potensi air asam dinding tambang akan difokuskan pada prakiraan kualitas

dan kuantitas air asam yang dihasilkan karena terpaparnya dinding tambang Batu Hijau setelah kegiatan pasca penambangan (mine closure). Kondisi litologi dinding tambang setelah kegiatan penambangan berakhir merupakan informasi penting yang harus diketahui pertama kali. Dengan mengetahui kondisi litologi dapat dilakukan upaya preventif supaya air asam tambang dapat dikelola dan dikendalikan setelah penambangan berakhir. Pengelolaan dan pengendalian ini dapat dilakukan dengan mengetahui potensi air asam tambang serta kualitas dan kuantitasnya (gambar 2).

Karena litologi dinding tambang pada kondisi pit-limit sudah diketahui, penelitian akan difokuskan pada batuan dinding tersebut.

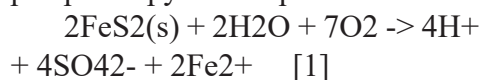
a. Proses Pembentukan Air Asam Tambang (AAT)

Cukup banyak teori yang menjelaskan mengenai AAT yang dihasilkan dari kegiatan penambangan, baik penambangan mineral radioaktif, mineral logam, mineral bukan logam atau batuan (UU Pertambangan Mineral dan Batubara No. 4 2009). Dalam penelitian ini akan disarikan penjelasan mengenai proses pembentukan AAT yang dikutip dari referensi Technical Document – Acid Mine Drainage Prediction diterbitkan oleh US-EPA pada bulan Desember 1994.

Oksidasi mineral sulfida yang menghasilkan air asam terdiri dari beberapa rangkaian reaksi kimia. Setiap mineral sulfida mempunyai kecepatan reaksi yang berbeda-beda, hal ini terjadi karena jenis mineral dan karakteristik setiap batuan juga berbeda. Sebagai contoh marcasite dan framboidal pyrite akan teroksidasi lebih cepat dibandingkan dengan crystalline pyrite yang teroksidasi lebih lambat. Rangkaian reaksi yang terjadi pada saat terjadi pembentukan

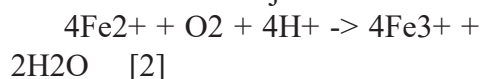
AAT dijelaskan di bawah ini.

Reaksi kimia pertama : pelapukan pyrite dan proses oksidasi.



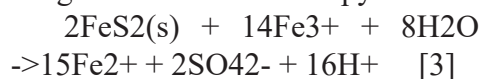
Pada reaksi di atas, oksidasi ion hydrogen dan sulfat akan menghasilkan asam sulfur dalam larutannya dan ion Fe^{2+} bebas untuk bereaksi lebih lanjut. Oksidasi ion ferrous menjadi ion ferric terjadi pada pH lebih rendah.

Reaksi kimia kedua : perubahan dari ion ferrous menjadi ion ferric.



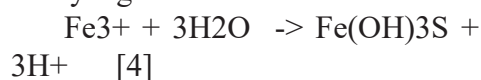
Pada pH di antara 3.5 dan 4.5, oksida besi sebagai katalis dari variasi metallogenium (filamentous bacterium). Pada pH dibawah 3.5 reaksi yang sama sebagai katalis besi dari bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*. Apabila ion ferric bertemu dengan pyrite maka akan terjadi reaksi melebur pyrite seperti dibawah ini:

Reaksi kimia ketiga : perubahan ion ferric menjadi ion ferrous karena dengan kehadiran air dan pyrite.



Reaksi ini menghasilkan lebih banyak asam. Terputusnya ikatan pyrite oleh ion ferric (Fe^{3+}) berkaitan dengan ion ferrous. Ion ferric mengendap sebagai hidroksi besi oksida dicirikan oleh reaksi dibawah ini:

Reaksi kimia keempat : hidrolisa besi yang memisahkan molekul air.



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ mengendap dan diidentifikasi sebagai deposit dari

amorphous, warna kuning, oranye, atau merah yang terendap di dasar aliran air dikenal sebagai “yellow boy”. Apabila pH dibawah 2.5, maka larutan kimia dicirikan dengan konsentrasi sulfat dan total iron yang tinggi dan ratio Fe^{3+}/Fe^{2+} juga tinggi (Mend Project 1.16.4, 1995).

Pembentukan AAT dimungkinkan karena tersedianya (1) Mineral sulfida – sumber sulfur/asam, (2) oksigen (dalam udara) - pengoksidasi, dan (3) Air – pencuci hasil oksidasi. Reaksi pertama adalah reaksi pelapukan dari pirit disertai proses oksidasi. pirit dioksidasi menjadi sulfat dan besi fero. Dari reaksi ini dihasilkan dua mol keasaman dari setiap mol pirit yang teroksidasi. Oksigen (O_2) terlarut dapat juga mengoksidasi tetapi kurang penting karena kelarutannya sangat terbatas • Reaksi ini dapat terjadi baik pada kondisi abiotik maupun biotik. Selain oksidasi langsung, pirit dapat juga terlarut dan selanjutnya teroksidasi.

b. Potensi Air Asam Tambang dari Dinding Tambang di Batu Hijau, NTB

Selama ini di lokasi penelitian, AAT yang terbentuk dari dinding tambang tidak dimasukkan sebagai salah satu komponen perhitungan kapasitas AAT untuk keperluan strategi daya kelola air (water management strategy). Penelitian mengenai air asam dinding tambang adalah upaya untuk mengetahui potensi AAT yang berasal dari dinding tambang dengan berbagai jenis litologi yang ada. Dengan demikian, diharapkan prakiraan kapasitas AAT akan lebih akurat dan strategi pengelolaan AAT akan lebih tepat dilaksanakan saat ini atau pada saat kegiatan penutupan tambang (mine closure).

Di lokasi tambang Batu Hijau terdapat beberapa aliran sungai dan kali yang sebagian besar mengalir pada

saat musim hujan (intermittent). Sungai-sungai besar yang mengalir melalui lokasi penambangan adalah: Sungai Sejong, Sungai Nangka, Sungai Tongoloka dan Sungai Santong. Terdapat banyak creek (brang) yang mengalir ke sungai-sungai besar tersebut. Pengukuran debit aliran sungai secara intensif telah dilakukan sejak tahun 2001 sampai dengan saat penelitian dilakukan. Pengukuran dilakukan secara manual setiap bulan dan pada saat terjadi banjir atau otomatis dengan data logger (interval 10 menit). Pengukuran debit aliran sungai penting diketahui dalam rangka mengetahui jumlah air yang akan diolah di fasilitas pengelolaan air asam di Tongoloka toe dike, Santong toe dike dan Kanloka toe dike. Untuk mengurangi beban fasilitas pengolahan air asam, maka sungai atau creek (brang) yang akan mengalir ke lubang tambang dialihkan melalui saluran terbuka (diversion channel) ke badan air di luar lubang tambang yang tidak tercemar air asam tambang. Dalam hal ini --secara teoretis-- air yang jatuh di lokasi penambangan dan mengalir ke dalam lubang tambang hanyalah air hujan dan rembesan air tanah dalam yang muncul ke permukaan dinding tambang karena terganggu oleh kemajuan penambangan. Agar air yang terdapat di dalam lubang tambang (pit lake) tidak mengganggu operasional penambangan, harus secara kontinu dilakukan pemompaan. Pada saat ini pemompaan air lubang tambang dilakukan secara berjenjang mengingat kedalam lubang tambang yang sudah mencapai level 225 meter dibawah permukaan laut.

Untuk memudahkan dalam pengendalian air tanah dalam yang mengalir keluar dari dinding tambang, maka dilakukan pengeboran secara horizontal dan bersudut di lokasi-lokasi dinding tambang yang terdapat air tanah yang terganggu. Selanjutnya air tanah

yang keluar dari lubang bor dikumpulkan di kolam pengendapan selanjutnya dialirkan dalam satu saluran menuju salah satu dari tiga fasilitas pengolahan air asam yang terdekat. Pembuatan lubang bor horisontal dan bersudut terus dilakukan untuk mengurangi potensi terjadinya longsoran karena pergerakan air tanah yang dapat mengganggu kesetabilan batuan (gambar 3)

Pada Gambar 4 di bawah ini merupakan salah satu contoh aliran air tanah yang berasal dari pemboran horizontal yang terus mengalirkan air. Aliran air masuk ke dalam saluran drainase yang selanjutnya mengalir menuju ke dalam kolam pengendapan di Kanloka.

Untuk keperluan perencanaan pengelolaan air asam lubang tambang setelah kegiatan penambangan selesai (pit-limit) pada tahun 2024, telah dihitung volume air yang akan mengisi lubang tambang setiap beda ketinggian lubang tambang 15 meter. Sesuai dengan nilai NCV, maka dilakukan uji kolom sebanyak 14 buah dan proses lindian mengandalkan curah hujan saja. Dari hasil pengukuran kualitas air sejak tahun 1995 dapat disimpulkan bahwa batuan yang terdapat di lokasi tambang Batu Hijau sebagian besar bersifat PAF.

Dari hasil pemantauan di lokasi tambang Batu Hijau, kualitas air yang berada di lokasi penambangan, baik yang berasal dari air tanah dalam di lubang pengamatan, air yang mengalir di lokasi tambang termasuk rembesan dan kualitas air dari uji kolom mempunyai pH rendah antara 2-4 dengan beberapa logam terlarut yang melebihi baku mutu kualitas air limbah. Akan terjadi kerusakan lingkungan yang buruk dan berlangsung lama apabila air dari lubang tambang sudah penuh dan melimpas ke badan air.

Lubang tambang dengan

volume maksimum sebelum melimpas 1.012.393.500 m³ akan mempunyai pH yang rendah apabila tidak dikelola dengan baik. Diperlukan waktu yang sangat lama untuk dapat mengisi lubang tambang, tetapi tetap harus diperkirakan kapan akan terjadi limpasan agar dapat dihindari dampak buruk yang akan terjadi. Daerah aliran sungai (DAS) sudah terbuka karena penambangan yang melingkupi lokasi tambang mencapai 26.665.700 m² yang diperkirakan aliran air hujan yang jatuh di DAS tersebut akan mengalir masuk ke lubang tambang. Setiap 1 mm curah hujan yang jatuh akan menghasilkan 0.001 m³ air di setiap m² luas permukaan tanah. Apabila evaporasi, infiltrasi, dan evapotranspirasi diabaikan, jumlah air yang akan mengalir ke dalam lubang tambang adalah 26.666 m³ per m² luas permukaan. Dengan demikian, air yang mengalir mempunyai pH yang rendah karena melalui daerah terbuka dengan batuan yang tergolong PAF.

c. Pengelolaan Air Asam Tambang untuk Mengantisipasi Perusakan Lingkungan

Air asam tambang yang dikenal sebagai air yang bersifat asam dengan ditandai memiliki tingkat keasaman (pH) yang rendah sebagai hasil oksidasi mineral sulfida yang terdapat pada batuan karena terpajan (terekspose) di udara dan teraliri oleh air. Batuan mengandung mineral sulfida terekspose karena penggalan yang menyebabkan permukaan batuan bersentuhan dengan udara dan air sehingga mineral sulfida teroksidasi yang menghasilkan air asam tambang. Proses oksidasi mineral sulfida semakin cepat dengan kehadiran mikroorganisme tertentu yang berperan sebagai reaktan, misalnya *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Apabila air asam tambang tidak dikelola dengan baik dan mengalir ke badan air (sungai, danau, air tanah, dan

sebagainya), maka akan menyebabkan kehidupan biota air menjadi terganggu atau bahkan punah. Hal ini disebabkan keseimbangan lingkungan air terganggu karena air yang bersifat asam dan mudah melarutkan logam-logam yang akan meracuni biota air.

Keberadaan air asam tambang merupakan salah satu dampak penting akibat kegiatan penambangan yang harus dikelola dengan serius dan bertanggung jawab. Hal ini dilakukan karena sudah banyak kejadian pencemaran air asam tambang yang tidak dikelola dengan baik dan telah menyebabkan pencemaran lingkungan selama ratusan tahun dan sampai saat ini masih berlangsung. Misalnya di California Amerika Serikat, terdapat 10 bekas lokasi penambangan yang menghasilkan air asam tambang dan mencemari lingkungan walau kegiatan penambangan telah lama berhenti. Salah satunya adalah tambang merkuri New Idria yang merupakan tambang merkuri tertua di California telah mencemari tanah pada area seluas 8.000 hektar mulai dari bagian dalam daerah Coast Ranges East membentang sampai Taman Nasional Pinnacles. Tambang New Idria beroperasi dari tahun 1854 sampai dengan 1970 tapi akibat pencemarannya masih terus berlangsung dan diperkirakan terdapat 21 juta galon aliran air asam tambang keluar dari New Idria dan masuk ke sungai lokal pada musim tertentu. Hal ini terjadi karena air bertemu dengan bijih besi dan belerang dan menjadi air asam yang selanjutnya terjadi kebocoran selama bertahun-tahun. Bocoran air terus mengalir melalui timbunan tailing sehingga melarutkan merkuri, arsenik, dan logam berbahaya lainnya.

Kondisi yang tidak jauh berbeda terjadi di tambang Iron Mountain Mine. Ini merupakan tambang besi yang lokasinya paling terkonsentrasi aliran air asam tambang yang ada di dunia. Air yang

keluar dari Iron Mountain mempunyai pH -3,6, lebih asam 6.300 kali dari asam baterai. Pada saat terjadi limpasan, aliran air asam masuk ke beberapa sungai yang selanjutnya mengalir ke Waduk Keswick di Sungai Sacramento. Sungai ini asalnya merupakan sumber air minum untuk Redding. Air larian dari tambang telah menyebabkan sebagian besar ikan mati di Sacramento sejak tahun 1899 dan telah mencemari kurang lebih 20 lokasi. Kejadian kebocoran dalam satu minggu di tahun 1967 telah membunuh 47000 ikan trout. Ini merupakan kebocoran ke 53 dari tambang ini. Pemerintah Federal memperkirakan tambang Iron Mountain akan menghasilkan aliran air asam sampai dengan 3000 tahun mendatang. Perlu dipahami bahwa apabila air asam tambang sudah terbentuk, maka akan sulit sekali menghentikannya, kecuali salah satu komponen pembentuk asam habis (Chris Clarke, 2015).

Kedua contoh di atas merupakan dampak yang disebabkan oleh air asam tambang. Akibatnya sangat fatal dan berbahaya. Selain itu, kondisi tersebut bisa berlangsung sangat lama bahkan dapat melebihi periode penambangan itu sendiri. Setelah penambangan berakhir pun, bahkan ratusan tahun setelahnya masih berdampak. Diperlukan biaya yang sangat besar untuk pengelolaannya.

Mencegah terbentuknya air asam tambang lebih baik daripada mengelolanya setelah air asam tambang sudah terbentuk. Tahap pertama dalam mencegah terbentuknya air asam tambang adalah dengan mengidentifikasi batuan-batuan yang berpotensi membentuk asam atau tahap “karakterisasi” apakah batuan tersebut termasuk sebagai jenis batuan penghasil asam (Potential Acid Forming - PAF) atau bukan penghasil asam (Non-Acid Forming – NAF). Tahap karakterisasi batuan perlu dilakukan mulai sejak tahap eksplorasi,

perencanaan, konstruksi, penambangan, dan pasca tambang. Dengan mengetahui sebaran batuan PAF dan NAF, maka rencana pencegahan terbentuknya air asam tambang akan menjadi lebih baik dan tepat. Apabila air asam tambang telah terbentuk karena tidak dilakukan pencegahan sejak awal, walaupun berbiaya mahal tetapi tetap harus dikelola. Tujuan utama pengelolaan air asam tambang adalah mencegah agar tidak terbentuk air asam tambang lebih lanjut. Mencegah terbentuknya air asam tambang di penambangan terbuka secara total susah dilakukan, terutama yang terbentuk di dinding dan dasar tambang karena kegiatan penambangan masih berlangsung. Pencegahan umumnya dilakukan di lokasi penimbunan batuan (ore, waste atau low-mid grade) atau dikenal sebagai overburden management plan (Sayoga, 2012). Pengelolaan air asam tambang dapat digolongkan menjadi dua yaitu pengelolaan: aktif dan pengelolaan pasif.

(a) Pengelolaan Aktif

Pengelolaan aktif adalah mencampur air asam tambang dengan jenis material yang bersifat basa (alkali), misalnya: batu kapur (CaCO_3), hydrated lime ($\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$), kapur tohor (CaO), soda abu (Na_2CO_3), caustic soda (NaOH), magna lime (MgO), fly ash, klin dust dan slag (Sayoga, 2012). Perlu diketahui pengelolaan secara aktif memerlukan sumber daya (material dan tenaga kerja) yang menerus dan dengan biaya sangat mahal. Pengelolaan aktif adalah cara mengelola air asam tambang yang sifatnya sementara dan umumnya berlangsung selama kegiatan penambangan saja.

(b) Pengelolaan Pasif

Pengelolaan pasif adalah pengelolaan secara alami yang tidak memerlukan intervensi manusia, walaupun infrastrukturnya dibuat oleh manusia. Pengelolaan memanfaatkan sumber daya yang tersedia di alami, seperti: gradien topografi, mikroba, fotosintesis dan energi kimia), tetapi tetap memerlukan pemeliharaan secara reguler untuk dapat berfungsi selamanya (sumber: Pulles et al, 2004). Contoh sistem pengelolaan pasif antara lain: lahan basah aerobik (aerobic wetlands), anoxic limestone drains (ALD), lahan basah anaerobik (anaerobic wetlands), reducing and alkalinity producing systems (RAPS) dan open limestone drains (OLD) (Sayoga, 2012). Pengelolaan pasif adalah cara pengelolaan air asam tambang jangka panjang dan dapat terus berlangsung selama dan setelah penambangan selesai (mine closure)

Hasil karakterisasi geokimia batuan dapat mengetahui potensi asam (kandungan sulfur) yang dihasilkan apabila batuan tersebut bersentuhan dengan udara terbuka, air dan bakteri. Batuan yang mengandung sulfur 1% dalam setiap ton batuan, maka akan menghasilkan asam sulfat sebesar 30.62 kg. Untuk menetralkan asam sulfat yang dihasilkan diperlukan 31.25 kg CaCO_3 . Selain mengandung sulfur, dalam batuan juga sering mengandung mineral alkali, misalnya carbonate yang dapat mengurangi proses oksidasi atau menetralkan asam yang terbentuk. Mineral alkali juga dapat mengontrol bakteri dan membatasi kelarutan dari logam besi.

Tambang Batu Hijau akan berakhir kegiatan penambangannya pada tahun 2024 dan potensi pembentukan air

asam tambang akan terjadi di sepanjang dinding tambang setelah tambang ditinggalkan. Pembentukan air asam tambang dapat juga terjadi di lokasi timbunan di Tongoloka, East dump dan Sejong. Rencana pengelolaan air asam setelah pasca tambang adalah seluruh air yang jauh ke lokasi bekas penambangan akan dikumpulkan di beberapa kolam sedimen dan airnya dialirkan ke dalam lubang tambang. Dengan demikian air yang akan ditampung di dalam lubang tambang adalah air hujan dan air tanah dari dinding tambang, air permukaan dan rembesan yang ditampung di kolam penampungan sebelum dialirkan ke lubang tambang. Lubang tambang Batu Hijau pada kondisi akhir dapat menampung air sebanyak 1.012.393.500 m³ pada level 315-meter dari permukaan laut (yang merupakan tepi tambang tertinggi).

Untuk mengetahui karakterisasi batuan di tambang Batu Hijau, maka telah dilakukan uji kolom (column test) sejak tahun 1995 sampai dengan 2017. Contoh batuan yang diuji adalah: diorite dan andesite yang diambil dari inti (core) hasil pemboran. Batuan diorite dan andesite ada yang berpotensi menghasilkan asam dan tidak (netral) yang ditentukan berdasarkan dari nilai NCV (Net Carbon Value). Batuan tergolong asam jika nilai $NCV < 0$ dan tergolong alkali atau netral jika nilai $NCV > 0$. Sesuai dengan nilai NCV, maka dilakukan uji kolom sebanyak 14 buah dan proses lindi mengandalkan curah hujan saja.

SIMPULAN

Dari penelitian air asam tambang di dinding bekas penambang Batu Hijau, Nusa Tenggara Barat membuktikan bahwa dinding tambang potensial

menghasilkan air asam tambang yang melimpah. Luapan ini akan menyebabkan kerusakan lingkungan terutama punahnya biota dalam air yang dialiri. Ketidakseimbangan ini akan berdampak serius terhadap kehidupan. Oleh sebab itu, perlu perencanaan pengelolaan agar tidak menimbulkan dampak negatif yang akan mengganggu lingkungan dan kehidupan secara umum. Ada dua upaya yang ditempuh sebagai alternatif pengelolaannya, yaitu pengelolaan aktif dan pengelolaan pasif. Yang dimaksud pengelolaan aktif adalah Pengelolaan aktif adalah mencampur air asam tambang dengan jenis material yang bersifat basa (alkali). Sementara pengelolaan pasif adalah pengelolaan secara alami yang tidak memerlukan intervensi manusia walaupun infrastrukturnya dibuat oleh manusia. Kedua metode ini merupakan tindakan antisipatif yang harus dilakukan untuk menjaga keseimbangan lingkungan dan sebagai upaya tanggung jawab moral dari dampak eksploitasi alam dan lingkungan akibat penambangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bayong Tjasyono HK (2004): *Klimatologi Edisi-2*, Bandung – Penerbit ITB
- Casino Geochemical Source Term Development, (2013): “Pit Wall Source Term”, 4 December 2013, J862-5.
- Elizabeth Jane Sherlock, (1987): *Evaluation of Static and Kinetic Prediction Test Data and Comparison With Field Monitoring Data*, The University of British Columbia.
- Ferguson and Erickson, (1988): *Technical Document – Acid Mine Drainage Prediction*, US. Environmental Protection Agency 1994
- Gautama, R.S. (2014): *Pembentukan, pengendalian dan pengelolaan air*

- asam tambang (acid mine drainage), ITB, Bandung.
- Morin, A Kevin (1990): "Acid drainage from mine walls: The main zone pit at Equity Silver Mines", Morwijk Enterprises Limited; Suite 1706L, 1600 Beach Avenue, British Columbia.
- Morin and Hutt (1997) dan (2001a): "International Kinetic Database Version 14"
- Morin, A Kevin and Hutt, M. Nora, (2000): "Prediction of water chemistry in mine lakes: The minewall technique".
- Morin, A Kevin and Hutt, M. Nora (2004): "The Minewall Approach for Estimating the Geochemical Effects of Mine Walls on Pit Lakes".
- Nusa Idaman Said, (2014): Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara: "Alternatif Pemilihan Teknologi"
- Otwinowski, M. (1994): " Quantitative Analysis of Chemical and Biological Kinetics for the Acid Mine Drainage Problem", Sinergy Technology 139, 31 - Avenue N.W. Calgary Alberta T2M 2P1 (Mend Project 1.51.1)
- Sayoga, Rudy. (2012): Pengelolaan Air Asam Tambang, Bimbingan Teknis Reklamasi dan Pasca Tambang pada Kegiatan Pertambangan Mineral dan Batubara, ESDM 20 Juni 2012
- SENES Consultants Limited, (1994): "Review of Waste Rock Sampling Techniques", Energy Mines and Resources CANMET – MSL Division (Mend Project 4.5.1)
- Tremblay, dkk., (1995): Mend Manual Volume 6 : Monitoring – Natural Resource Canada (CANMET), 555 Booth Street, Ottawa Ontario KIA 0G1
- Tremblay, dkk., (2000): Mend Manual Volume 2: Sampling and Analysis – Natural Resource Canada (CANMET), 555 Booth Street, Ottawa Ontario KIA 0G1
- Tremblay, dkk., (2000): Mend Manual Volume 3: Prediction, 2000 – Natural Resource Canada (CANMET), 555 Booth Street, Ottawa Ontario KIA 0G1
- Tremblay, dkk., (2000): Mend Manual Volume 1: Summary, 2000 – Natural Resource Canada (CANMET), 555 Booth Street, Ottawa Ontario KIA 0G1
- Zhong-Sheng (Simon) Liu, dkk., (2017): "Experimental models of metal leaching for scaling-up to the field"., 9th AMD.