

**KEMAMPUAN KONSORSIUM BAKTERI DARI SEDIMEN *MANGROVE*
DALAM MEREDUKSI SULFAT DAN KANDUNGAN LOGAM BERAT
BESI (Fe) PADA AIR ASAM TAMBANG BATUBARA**

OLEH

MUHAMMAD RIFAAT

H411 15 310



**DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

**2019KEMAMPUAN KONSORSIUM BAKTERI DARI SEDIMEN
MANGROVE DALAM MEREDUKSI SULFAT DAN KANDUNGAN
LOGAM BERAT BESI (Fe) PADA AIR ASAM TAMBANG BATUBARA**

OLEH

MUHAMMAD RIFAAT

H411 15 310

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu tugas Akhir dan Syarat Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Sains pada program studi
biologi

**DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

HALAMA PENGESAHAN

**KEMAMPUAN KONSORSIUM BAKTERI DARI SEDIMEN *MANGROVE*
DALAM MEREDUKSI SULFAT DAN KANDUNGAN LOGAM BERAT
BESI (Fe) PADA AIR ASAM TAMBANG BATUBARA**

Disetujui oleh :

Pembimbing Utama



Dr. Fahrudin, M.Si.
NIP. 19650915 199103 1 002

Pembimbing Pertama



Drs. Asadi Abdullah, M.Si.
NIP. 19620303 198903 1 007

Makassar, 14 Agustus 2020

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi ini merupakan karya orisinal saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk memperoleh gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau di lembaga pendidikan lainnya, dimanapun, kecuali yang telah dikutip sesuai kaidah yang berlaku. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya saya sendiri dan dibantu oleh pihak pembimbing.

Makassar, 14 Agustus 2020

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Muhammad Rifaat', written in a cursive style.

Muhammad Rifaat

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur atas kemuliaan dan rahmat yang telah diberikan sepatutnya penulis panjatkan kehadirat Allah subhanahu wataala. Salam serta salawat taklupa tercurahkan pada Nabi Muhammad sallallahu alaihi wasallam, keluarga, sahabat serta pengikutnya. Alhamdulillah skripsi yang berjudul “Kemampuan Konsorsium Bakteri Dari Sedimen Mangrove Dalam Mereduksi Sulfat dan Kandungan Logam Berat Besi (Fe) Pada Air Asam Tambang Batubara” dapat terselesaikan dengan baik dan lancar. Skripsi ini sebagai syarat dalam menyelesaikan jenjang Pendidikan tinggi di Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin Makassar.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini tidak sedikit halangan dan kondisi yang menjaadi hambatan. Namun, doa dan dorongan dari berbagai pihak selalu menjadi semangat lebih dalam menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Terima kasih yang tiada putusnya penulis ucapkan kepada oaring tua, ayahanda **Sarifuddin** dan ibunda **Rudiah** tercinta atas segenap doa dan kasih sayang yang tiada batas serta kakak dan adik-adikku yang selalu memotivasi diri penulis. Selesaiannya skripsi ini juga menjadi bukti dedikasih dan tanggung jawab besar dari yang terhormat bapak **Dr. Fahrudin, M.Si.** selaku pembimbing utama sekaligus sebagai penasehat akademik dan bapak **Drs. Asadi Abdullah, M.Si.** selaku pembimbing pertama yang telah meluangkan diri dalam membimbing dan mendidik penulis sejak awal penelitian hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang baik, penulis ucapkan pula kepada:

1. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, M.Si.** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin yang selalu memberikan petunjuk dan dorongan untuk menyelesaikan studi.
2. Bapak **Dr. Andi Ilham L, M.Si.** selaku wakil dekan bidang kemahasiswaan, alumni, dan kemitraan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin sekaligus tim penguji yang banyak membangun karakter yang baik bagi penulis.
3. Ibunda **Dr. Nurhaedar, M.Si.** selaku ketua Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin beserta segenap staf pegawai yang tidak pernah melepaskan perhatian beliau kepada setiap mahasiswanya.
4. Bapak **Drs. Muh. Ruslan Umar** selaku tim penguji yang banyak memberi saran, arahan serta motivasi dalam setiap seminar maupun sidang penulis.
5. Ibu **Prof. Dr. Hj. Dirayah R. Husain, DEA.** selaku penanggungjawab Laboratorium Mikrobiologi Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin
6. Segenap bapak dan ibu dosen yang banyak membekali ilmu pengetahuan pada penulis dalam bangku kuliah maupun kegiatan lain.
7. Segenap bapak dosen penguji yang meluangkan waktu dan pikirannya dalam pelaksanaan ujian.

8. Saudara-saudaraku **Bioclemat15** yang tidak berhenti memberikan pelajaran besar dalam dinamika kehidupan mahasiswa, semoga tetap utuh, harmonis dan selalu ada.
9. Kawan-kawan **MIPA 2015** yang telah menemani penulis dalam membangun arah dan jatidiri bersama.
10. Kanda **Fuad Gani, S.Si**, dan kanda **Heriadi, S.Si**, yang sangat banyak membimbing dan membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Sahabatku **Abdul Wahab** sebagai rekan kerja yang banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Kanda-kanda, adik-adik dan teman-teman di **HIMBIO FMIPA Unhas** dan **UKH Canopy Biologi**, yang banyak mengajar dan memberikan semangat.
13. Semua pihak yang ikut terlibat baik secara langsung ataupun tidak langsung dalam menyelesaikan skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, semoga bantuan yang diberikan menjadi pahala.

Penulis menyadari betul bahwa skripsi ini masih sangat jauh dari kesempurnaan dan masih tetap perlu dikembangkan. Oleh karena itu kritik serta saran yang membangun akan sangat membantu dan memotivasi khususnya pada diri penulis. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kira semua dan mengambil peran yang baik dalam kemajuan ilmu pengetahuan, Aamiin.

Wassalamualaikum Wwarahmatullahi Wabarakatuh

Makassar, 14 Agustus 2020

Penulis



Muhammad Rifaat

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan konsorsium bakteri dari sedimen *mangrove* dalam mereduksi sulfat dan kandungan logam berat besi (Fe) pada air asam tambang batubara. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan inokulum buatan dari sedimen dari kompos dan air asam tambang (AAT) lalu diberi konsorsium bakteri yang telah diisolasi dari sedimen *mangrove*. Perlakuan yang diberikan dengan penambahan kompos steril dan non-steril dari kotoran hewan pada konsorsium serta AAT tanpa perlakuan sebagai control, lalu diamati selama satu bulan dengan interval lima hari. Hasilnya memperlihatkan peningkatan nilai pH yang menjadi normal serta menurunnya konsentrasi sulfat dan logam berat terlarut. Pemberian kompos sebagai sumber bahan organik akan meningkatkan kemampuan bakteri pereduksi sulfat, dimana penambahan kompos non-steril lebih optimal dibanding dengan kompos steril.

Kata kunci: Air asam tambang, bakteri pereduksi sulfat, sedimen mangrove, kompos, pH, logam berat

ABSTRACT

This study was conducted to determine the ability of a bacterial consortium of mangrove sediments to reduce sulfate and heavy metal content of iron (Fe) in the coal mine acidic water. This research was conducted using artificial inoculums from sediments from compost and acid mine drainage (AMD) and then given a consortium of bacteria that had been isolated from mangrove sediments. The treatment given by the addition of sterile and non-sterile compost from animal manure in the consortium and AMD without treatment as a control, then observed for one month at intervals of five days. The results showed an increase in the pH value which became normal and decreased concentration of sulfate and dissolved heavy metals. Giving compost as a source of organic material will increase the ability of sulfate reducing bacteria, where the addition of non-sterile compost is more optimal than that of sterile compost.

Keywords: Acid mine drainage, sulfate reducing bacteria, mangrove sediments, compost, pH, heavy metal

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vii
ABSTACK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Tujuan Penelitian	4
I.3 Manfaat Penelitian	4
I.4 Waktu dan Tempat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Pencemaran Lingkungan	5
II.2 Industri Pertambangan	8
II.2.1. Pencemaran Limbah Pertambangan	10
II.2.2 Pencemaran Logam Berat	12
II.2.3 Air Asam Tambang (AAT)	14
II.2.4 Pengolahan Air Asam Tambang (AAT)	20

II.3 Bioremediasi	21
II.4 Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS)	22
BAB III. METODE PENELITIAN	26
III.1 Alat.....	26
III.2 Bahan	26
III.3 Cara Kerja	26
III.3.1 Pengambilan Sampel	26
III.3.2 Sterilisasi Alat	27
III.3.3 Pembuatan Media	27
A. Media Nutrient Agar (NA)	27
B. Media Triptone Soy Broth (TSB)	27
III.3.4 Isolasi Bakteri Sedimen	27
III.3.5 Pemurnian Isolat Bakteri	28
III.3.6 Pembuatan Inokulum Konsorsium Bakteri	28
III.3.7 Penyiapan Wadah Perlakuan	28
A. Perhitungan Total Bakteri	29
B. Analisa kandungan sulfat	29
C. Pengukuran pH	30
D. Analisa kandungan logam berat Fe	30
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
IV. 1 Isolasi Bakteri Sedimen	31
IV. 2 Perhitungan Total Bakteri	33
IV.3 Penurunan Kandungan Sulfat	35
VI. 4 Penurunan Ph	37

VI. 5 Penurunan Kandungan Logam Besi (Fe)	39
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	42
V.1 Kesimpulan	42
V.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN	48

DAFTAR GAMBAR

Gamba	Halan
Gambar 1. Koloni bakteri sedimen <i>mangrove</i> pada media <i>Nutrient Agar</i>	31
Gambar 2. Koloni terpisah isolat dengan metode <i>quadran streak</i>	32
Gambar 3. Hasil pertumbuhan total bakteri	34
Gambar 4. Hasil pengukuran kadar sulfat	36
Gambar 5. Hasil pengukuran kadar pH	38
Gambar 6. Hasil pengukuran kadar logam besi (Fe)	40

DAFTAR TABEL

Tabel	Halan
Tabel 1. Karakteristik morfologi koloni isolat bakteri sedimen rawa	32

DAFTAR LAMPIRAN

Skema Kerja	48
Gambar Pemurnian bakteri Sedimen Mangrove	49
Gambar Isolat Bakteri Sedimen Mangrove	50
Gambar Konsorsium Bakteri Sedimen Mangrove	50
Gambar Perlakuan Air Asam Tambang	51

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kebutuhan manusia untuk meningkatkan kualitas hidup berjalan lurus dengan pengembangan teknologi yang kini makin pesat khususnya pada sektor pengolahan sumber daya alam. karena itu Kementerian Perindustrian Republik Indonesia pun telah mengadakan kebijakan industri nasional yaitu Indonesia menjadi negara industri tangguh pada tahun 2025. Pada proyeksi kebutuhan sumber daya alam industri berbasis mineral tambang, migas dan batubara digambarkan selalu meningkat tiap tahun, ini merupakan salah satu upaya mewujudkan negara industri tangguh tersebut (Pusat Komunikasi Publik Kementerian Perindustrian, 2015).

Aktivitas pertambangan memiliki dua sisi yang saling berlawanan, yaitu sebagai sumber kemakmuran sekaligus perusak lingkungan yang sangat potensial (Hakim, 2014). Dunia pertambangan sering dianggap sebagai perusak alam dan juga lingkungan. Kegiatan pertambangan selain menghasilkan produk utama juga menghasilkan produk buangan berupa limbah yang dapat berpotensi menurunkan daya dukung lingkungan di sekitar daerah penambangan maupun *emplacement area* (Rahmawati dan Widyastuti, 2013).

Salah satu persoalan terbesar yang dihadapi industri pertambangan adalah adanya air asam tambang (AAT) yang terbentuk karena terangkatnya mineral-mineral sulfida terutama pirit, yang kemudian langsung mengalir ke sungai, danau dan lingkungan akuatik lainnya (Fadilla, *et al.*, 2015). Curah hujan yang tinggi dan

sisa bahan galian yang tersusun atas mineral sulfidik merupakan penyebab utama tingginya fenomena air asam tambang di Indonesia. Air asam tambang mengakibatkan air di sekitar lokasi penambangan tidak layak untuk mendukung kehidupan masyarakat sekitar (Widyati, 2009). Ini akan memberikan serangkaian efek yang saling terkait, yaitu menurunkan pH, mengganggu ketersediaan dan keseimbangan nutrisi tanah, dan meningkatkan kelarutan zat gizi mikro yang umumnya merupakan unsur logam (Kusumawati, 2017). Menurunnya pH akibat AAT memberikan serangkaian dampak pada lingkungan. Dampak penurunan pH yang paling penting adalah meningkatnya kelarutan logam-logam termasuk logam berat. Logam merupakan kofaktor dan aktivator enzim-enzim, sehingga apabila masuk ke dalam tubuh hewan, tumbuhan, mikroba dan manusia akan bersifat toksik dan mengacaukan sistem metabolisme. Oleh karena hal tersebut, kandungan logam berat harus menjadi perhatian utama pada pengelolaan air asam tambang (Widyati, 2011).

Permasalahan utama AAT adalah terakumulasinya sulfat. Telah banyak penelitian yang mengkaji tentang cara menurunkan konsentrasi sulfat pada air asam tambang (AAT) salah satunya dengan metode biologi. Metode biologi yang dapat digunakan adalah bioremediasi dengan menggunakan mikroorganisme dalam menanggulangi bahan pencemar untuk pemulihan lahan dan perairan tercemar. Salah satu alternatif bioremediasi adalah menggunakan bakteri pereduksi sulfat (BPS) untuk mereduksi sulfat, disamping itu juga mampu menurunkan konsentrasi logam berat (Fahrudin, *et al.*, 2014). Metode biologi atau bioremediasi oleh mikroorganisme merupakan salah satu cara yang tepat, efektif dan hampir tidak ada pengaruh sampingannya pada lingkungan karena tidak menghasilkan racun atau

blooming selain mudah dan tidak menggunakan biaya yang besar (Lewaru, *et al.*, 2012).

Bakteri pereduksi sulfat (BPS) mampu menggunakan ion sulfat, sulfit atau thiosulfat sebagai aseptor elektron untuk mendapatkan energi dalam proses metabolismenya. Ion-ion tersebut setelah menerima elektron akan tereduksi menjadi sulfida. Terbentuknya hidrogensulfida juga akan sangat menguntungkan terhadap lingkungan yang mengandung logam terlarut tinggi. Karena senyawa ini sangat reaktif dan akan segera bereaksi dengan logam membentuk logam-sulfida yang sangat stabil. Dalam pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat juga membutuhkan bahan-bahan organik yang cukup bagi aktivitas metabolismenya (Hards and Higgins, 2004). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tanah bekas tambang batubara yang diberi perlakuan bahan organik yang dikoloni oleh BPS dapat menurunkan ketersediaan logam Fe, Mn, Zn dan Cu dalam tanah dengan efisiensi antara 68 - 97% setelah 15 hari inkubasi (Widyati, 2006).

Proses pengolahan AAT secara biologis, perlu dilakukan secara lebih efisien dan ekonomis yaitu dengan menambahkan bahan organik dari sedimen lahan basah atau *wetland*. Bahan organik ini secara alami terdapat banyak BPS, sehingga tidak perlu lagi diinokulasi mikroba dari luar, serta penambahan nutrisi. Kandungan bahan organik yang tinggi dalam sedimen *wetland* seperti rawa, sawah, *mangrove* dan sebagainya menyediakan lingkungan yang ideal untuk populasi bakteri pereduksi sulfat (May, 2007)

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dilakukan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh konsorsium bakteri *mangrove* terhadap Sulfat dan penurunan konsentrasi logam berat Fe.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu :

1. Untuk mengetahui kemampuan konsorsium bakteri sedimen *mangrove* dalam menurunkan konsentrasi sulfat dan logam berat Fe.
2. Untuk mengetahui pengaruh pemberian kompos pada konsorsium bakteri sedimen *mangrove* dalam menurunkan konsentrasi sulfat dan logam berat Fe.
3. Untuk mengetahui hubungan antara penurunan kadar pH dengan konsentrasi sulfat.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharap dapat digunakan untuk mengembangkan potensi konsorsium bakteri sedimen *mangrove* untuk pengelolaan limbah air asam tambang yang mengandung sulfat dan logam berat Fe serta memberikan informasi kepada pelaku industri tambang dan pemerintah dalam mengelola limbah yang mengandung sulfat dan logam berat secara biologi menggunakan konsorsium bakteri.

I.4 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus 2019 – selesai di Laboratorium Mikrobiologi, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Pengambilan sampel dilakukan di daerah vegetasi *mangrove* di desa Kera-kera kecamatan Tamalanrea, Kota Makassar

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Pencemaran Lingkungan

Lingkungan tidak hanya berbicara tentang komponen biotik atau makhluk hidup dan abiotik seperti air, tanah, udara, cahaya, energi dan lain-lain. Lingkungan adalah jumlah semua benda dan kondisi yang ada dalam ruang yang kita tempati yang mempengaruhi kehidupan kita. Lingkungan hidup sebagai semua benda dan kondisi termasuk di dalamnya manusia dan tingkah perbuatannya, yang terdapat dalam ruang tempat manusia berada dan mempengaruhi hidup serta kesejahteraan manusia dan jasad hidup lainnya. Menurut pengertian juridis, dalam UU tentang Ketentuan-ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 1982 (telah direvisi tahun 2009), lingkungan hidup diartikan sebagai kesatuan ruang dengan semua benda, daya dan keadaan dan makhluk hidup, termasuk didalamnya manusia dan perilakunya yang mempengaruhi lingkungan, perikehidupan dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lainnya. Pengertian ini hampir tidak berbeda dengan yang ditetapkan dalam UU tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 23 Tahun 1997 (Siahan, 2004).

Manusia dianggap paling menentukan dalam tatanan ekosistem, sehingga ia bisa melakukan apa saja terhadap lingkungan, walaupun dengan cara-cara yang merusak lingkungan. Sebagai akibatnya, kini telah terjadi apa yang dinamakan dengan krisis lingkungan, seperti krisis air, udara bersih dan sebagainya. Krisis ini telah pula menjadi salah satu penyumbang terjadi krisis global yang serius. Lingkungan mempengaruhi hidup manusia dan sebaliknya manusia dipengaruhi

oleh lingkungan hidupnya. Manusia ada dalam lingkungan hidupnya dan tidak dapat dipisahkan dari padanya. Dengan demikian lingkungan hidup menjadi bagian penting dari kehidupan manusia untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Jika lingkungan hidup rusak maka kebutuhan hidup manusia akan terganggu. Lingkungan hidup yang rusak adalah lingkungan yang tidak dapat lagi menjalankan fungsinya dalam mendukung kehidupan (Baihaki, 2018).

Polusi atau pencemaran lingkungan adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam sehingga kualitas lingkungan turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya (UU Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 1982).

Pencemaran atau polusi dapat pula diartikan suatu kondisi yang telah berubah dari bentuk asal pada keadaan yang lebih buruk. Pergeseran bentuk tatanan dari kondisi asal pada kondisi yang buruk ini dapat terjadi sebagai akibat masukan dari bahan-bahan pencemar atau polutan. Bahan polutan tersebut pada umumnya mempunyai sifat racun (toksik) yang berbahaya bagi organisme hidup. Toksisitas atau daya racun dari polutan itulah yang kemudian menjadi pemicu terjadinya pencemaran (Ainuddin, 2017).

Maraknya kerusakan lingkungan telah menimbulkan dampak yang sangat merugikan bagi umat manusia serta alam ini. Ada banyak faktor yang menjadi penyebab rusaknya lingkungan, yaitu faktor alam yang tidak dapat kita hindari seperti gempa bumi, tsunami, puting beliung, juga yang disebabkan karena perilaku manusia seperti illegal logging, pencemaran air, eksploitasi sumber daya alam

secara besar-besaran. Permasalahan lingkungan sudah menjadi bagian dari masalah masyarakat dunia. Semua pihak perlu untuk memperhatikan hal tersebut, supaya dampak negatif tidak berkepanjangan. Adalah tepat ketika PBB mengadakan Konferensi Lingkungan Hidup pada tanggal 5-16 Juni 1972 di Stockholm yang dihadiri oleh wakil dari 110 negara dalam menanggulangi permasalahan lingkungan hidup, disamping itu, kita mengenal adanya acara bersih desa yang mewajibkan secara periodik masyarakat bersama-sama membersihkan lingkungan yang juga menjadi salah satu upaya menjaga lingkungan hidup. Hanya saja karena dampak dari suatu kegiatan yang dapat mencemari dan merusak lingkungan tidak dapat dilokalisif efeknya secara keseluruhan, maka perlu adanya kesatuan pandangan untuk menyelesaikannya. Seperti misalnya terjadi kebakaran hutan di Kalimantan, efeknya bisa saja memasuki wilayah Malaysia, Brunai atau negara lain. Demikian juga sumber kerusakan lingkungan dari negara lain sangat mungkin dirasakan pula akibatnya di Indonesia (Dewi, 2012).

Beberapa cara penggolongan pencemaran lingkungan hidup, seperti (Utina dan Banderan, 2009):

- a. Menurut jenis lingkungan, yaitu; pencemaran air, pencemaran laut, pencemaran udara, pencemaran tanah dan pencemaran kebisingan (bunyi).
- b. Menurut sifat bahan pencemar, yaitu; pencemaran biologis, pencemaran kimia, dan pencemaran fisik.
- c. Menurut lamanya bahan pencemar bertahan dalam lingkungan, yaitu; bahan pencemar yang lambat atau sukar diuraikan seperti bahan kaleng, plastik, deterjen, serta bahan pencemar yang mudah diuraikan (*degradable*) seperti bahan-bahan organik.

Ditinjau dari segi usaha penanggulangannya terbagi menjadi dua golongan. Bahan-bahan pencemar yang tidak dapat diuraikan (*nondegradable*) juga mencakup bahan-bahan pencemar yang sangat lambat penguraiannya seperti DDT (Dichloro Dipheyl Trichlorethane), sehingga proses alamiah tidak dapat mengimbangi laju pemasukannya ke dalam ekosistem sehingga makin lama makin banyak. Dalam rantai makanan, bahan pencemar ini sering mengalami kelipatan secara biologis dalam ekosistem. Bahan pencemar yang mudah diuraikan secara biologis (*bio-degradable*), seperti bahan buangan organik mempunyai mekanisme pengolahan secara alamiah. Panas atau *thermal pollution* termasuk golongan *bio-degradable* karena panas dapat tersebar secara alamiah. Tetapi jika input bahan pencemar ini terlalu cepat sehingga melampaui daya asimilasi alamiah, maka akan terjadi juga masalah pencemaran seperti halnya bahan buangan organik (Utina dan Banderan, 2009).

II.2 Industri Pertambangan

Pesatnya pembangunan industri selain dampak positif, kemajuan industri juga menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Merupakan suatu kenyataan yang harus dihadapi bahwa dalam proses produksi suatu industri selain produk yang bernilai juga dihasilkan limbah. Limbah tersebut apabila tidak dikelola secara benar dapat menyebabkan terjadinya pencemaran pada lingkungan (Moertinah, 2010).

Batubara adalah bisnis energi yang paling besar. Saat ini sekitar 30% dari energi listrik yang dihasilkan dunia berasal dari batubara. China merupakan pengguna batubara paling besar di dunia, dengan konsumsi sekitar 50% dari konsumsi dunia atau diperkirakan mencapai nilai 4,1 milyar ton per tahunnya dan

menghasilkan sekitar 80 persen tenaga listrik yang ada di China. Indonesia adalah salah satu negara penghasil batubara yang cukup besar. Jumlah sumber daya batubara Indonesia berdasarkan perhitungan Pusat Sumber Daya Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2005 adalah sebesar 61,366 miliar ton. Jika dilihat dari laju pertumbuhan ekonomi negara-negara Asia, diperkirakan pada tahun 2030 penggunaan batubara untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di Asia akan mencapai 7 milyar ton per tahun. Dengan jumlah kebutuhan yang besar tersebut, permintaan batubara di Asia akan terus meningkat. Sebagai salah satu negara penghasil batubara di dunia, Indonesia berpeluang untuk terus meningkatkan hasil produksi batubaranya. Dengan semakin meningkatnya kegiatan penambangan batubara, potensi akan timbulnya dampak negatif yang diakibatkanpun akan semakin meningkat (Said, 2014).

Kegiatan penambangan merupakan kegiatan dengan daya ubah lingkungan yang sangat besar. Kegiatan ini dapat mengakibatkan terjadinya perubahan lingkungan yang dapat memicu terjadinya perubahan kimiawi yang berdampak pada kualitas air tanah dan air permukaan. Selain itu kegiatan penambangan juga akan mengakibatkan terjadinya perubahan fisik berupa perubahan morfologi dan topografi lahan. Lebih dari itu, iklim mikro pun akan turut mengalami perubahan akibat berubahnya kecepatan angin, gangguan habitat biologi berupa flora dan fauna, serta penurunan produktivitas tanah (Said, 2014).

Salah satu permasalahan yang terjadi pada saat penambangan batubara adalah masalah air asam tambang, yaitu air hujan atau air tanah yang tercampur dengan batuan yang mengandung sulfida tertentu yang ada di dalam batubara, sehingga air tersebut bersifat sangat asam dan biasanya mengandung zat besi serta

mangan dengan konsentrasi yang tinggi. Selain itu pada saat penambangan air tanah atau air hujan yang terkumpul di dalam kolam tambang selain bersifat asam juga seringkali mengandung zat padat tersuspensi (*suspended solids*) dengan konsentrasi yang tinggi. Pada saat pengerukan atau penambangan batubara air tersebut harus dikeringkan atau dibuang dan sebelum dibuang atau dialirkan ke badan air harus diolah terlebih dahulu sampai memenuhi baku mutu sesuai dengan peraturan yang berlaku (Said, 2014).

II.2.1. Pencemaran Limbah Pertambangan

Setiap industri dan pertambangan pada dasarnya memiliki potensi yang besar untuk menghasilkan limbah melalui proses produksi dan industri yang dijalankan. Bentuk limbah tersebut dapat berupa gas, cair atau padat. Bahaya lain adalah limbah yang dihasilkan ini juga dapat mengalami reaksi-reaksi fisika, kimia ataupun biologi dan menghasilkan zat yang lebih berbahaya. Potensi serta dampak industri dan penggunaan teknologi terhadap lingkungan hidup dan manusia akan mengurangi serta menurunkan kualitas hidup manusia, maka diperlukan kecermatan dan perhatian khusus untuk mengatasi masalah tersebut guna memperoleh kualitas hidup dan kenyamanan hidup yang lebih baik (Wardhana, 2004).

Mekanisme peralatan pertambangan telah mengakibatkan skala pertambangan semakin cepat dan luas. Untuk mendapatkan lapisan bijih yang mengandung bahan tambang tinggi dilakukan pembukaan dan pengupasan tanah hutan serta adanya tumpukan limbah yang dihasilkan dan menyebabkan kerusakan lingkungan secara luas. Adapun jenis limbah yang dihasilkan dari pertambangan

yaitu air tambang, limbah batuan *overbudden*, larutan sisa roses *tailing*, bijih sisa dan *sludge* (Fahrudin, 2010).

Diantara jenis limbah yang dihasilkan, volume dan dampak terbesar adalah limbah tambang terbuka yang dikenal sebagai *overbudden* dan limbah dari proses pengolahan bijih menjadi konsentrat yang disebut *tailing*. *Overbudden* adalah batuan yang tidak mengandung bijih atau kadar bijihnya dianggap terlalu rendah untuk dapat diolah secara ekonomis menurut proses terapannya. Batuan yang bukan merupakan cebakan atau cadangan yang tidak layak diolah lebih lanjut disebut *overbudden* dan harus disisihkan terlebih dahulu, sebelum sampai pada batuan yang layak ditambang untuk diolah. *Tailing* adalah limbah yang berbentuk pasir kasar dan halus yang kadar logamnya terlalu kecil untuk digiling lebih halus dan diolah lagi. *Tailing* dan *overbudden* yang mengandung sulfida akan teroksidasi bila kontak dengan oksigen dan air, menghasilkan sulfat sebagai penyebab kemasaman pada lingkungan tanah dan air (Fahrudin, 2010).

Limbah pertambangan yang dapat menimbulkan masalah keasaman dapat berasal dari batuan panutup (*overbudden*) dan lumpur (*tailing*) dari proses ekstraksi loga. Tanah dan batuan ini dianggap tidak mempunyai nilai ekonomi dan akhirnya dibuang sebagai limbah. Tanah penutup merupakan lapisan tanah yang dapat berupa tanah, pasir, bebatuan yang menutupi kandungan (deposit) bahan tambang atau bijih yang dapat ditambang. Limbah tambang berupa lumpur merupakan campuran dari sisa bahan tambang (bijih) dan bahan-bahan kimia yang digunakan dalam proses ekstraksi, limbah tersebut harus diukur tingkat toksisitasnya untuk penentuan metode yang tepat dalam penanganannya (Sofian, 2014).

Pengelolaan limbah industri dan pertambangan sangat penting untuk dilaksanakan karena limbah yang dibuang tanpa memperhitungkan efek yang ditimbulkan untuk saat ini maupun dalam jangka waktu yang lama akan memberikan dampak yang buruk terhadap lingkungan dan generasi yang akan datang. Hal tersebut diatur dalam UU No. 4 Tahun 2009 tentang pertambangan mineral dan batubara (Kobandaha, 2017).

II.2.2 Pencemaran Logam Berat

Air limbah usaha dan/atau kegiatan pertambangan batubara adalah air yang berasal dari kegiatan penambangan batubara yang meliputi penggalian, pengangkutan dan penimbunan baik pada tambang terbuka maupun tambang bawah tanah. Baku mutu air limbah batubara adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan atau jumlah unsur pencemaran yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah batubara yang akan dibuang atau dilepas ke air permukaan. Parameter yang dimonitoring pada air limbah kegiatan penambangan batubara adalah TSS (*total suspended solid*), total Fe dan total Mn (KepMenLH, No.113/2003).

Kawasan sungai sering dicemari oleh logam-logam berat yang terdapat dalam air buangan dari kawasan industri yang biasanya tidak diolah terlebih dahulu. Pencemaran logam berat seperti Besi (Fe), Mangan (Mn), Seng (Zn), Kadmium (Cd), Cromium (Cr), Tembaga (Cu), Timbal (Pb), Nikel (Ni) dan Raksa (Hg), Berdasarkan sudut pandang toksikologi, logam berat ini dapat dibagi dalam dua jenis. Jenis pertama adalah logam berat esensial, di mana keberadaannya dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme hidup, namun dalam jumlah yang berlebihan dapat menimbulkan efek racun. Contoh logam berat ini adalah Zn, Cu,

Fe, Co, Mn, Ni dan sebagainya. Sedangkan jenis kedua adalah logam berat tidak esensial atau beracun, di mana keberadaannya dalam tubuh masih belum diketahui manfaatnya atau bahkan dapat bersifat racun, seperti Hg, Cd, Pb, Cr dan lain-lain. Logam berat ini dapat menimbulkan efek kesehatan bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh. Apabila kepekatan logam-logam ini tinggi dari biasa, logam-logam ini akan menjadi suatu ancaman bagi kesehatan manusia jika memasuki rantai makanan. Oleh karena itu pemantauan kadar logam berat dalam air sungai sangat perlu dilakukan (Yudo, 2006).

Logam berat adalah unsur logam yang mempunyai densitas $> 5 \text{ g/cm}^3$ dalam air laut, logam berat terdapat dalam bentuk terlarut dan tersuspensi. Dalam kondisi alami ini, logam berat dibutuhkan oleh organisme untuk pertumbuhan dan perkembangan hidupnya. Peningkatan kadar logam berat dalam air sungai umumnya disebabkan oleh masuknya limbah industri, pertambangan, pertanian dan domestik yang banyak mengandung logam berat. Peningkatan kadar logam berat dalam air akan mengakibatkan logam berat yang semula dibutuhkan untuk berbagai proses metabolisme akan berubah menjadi racun bagi organisme akuatik. Logam berat jika sudah terserap ke dalam tubuh maka tidak dapat dihancurkan tetapi akan tetap tinggal di dalamnya hingga nantinya dibuang melalui proses ekskresi. Hal serupa juga terjadi apabila suatu lingkungan terutama di perairan telah terkontaminasi (tercemar) logam berat maka proses pembersihannya akan sulit sekali dilakukan. Kontaminasi logam berat ini dapat berasal dari faktor alam seperti kegiatan gunung berapi dan kebakaran hutan atau faktor manusia seperti pembakaran minyak bumi, pertambangan, peleburan, proses industri, kegiatan

pertanian, peternakan dan kehutanan, serta limbah buangan termasuk sampah rumah tangga. Selain bersifat racun, logam berat juga terakumulasi dalam sedimen dan biota melalui proses biokonsentrasi, bioakumulasi dan biomagnifikasi oleh biota laut. Logam-logam berat yang masuk ke dalam tubuh hewan umumnya tidak dikeluarkan lagi dari tubuh mereka. Karena itu logam-logam cenderung untuk menumpuk dalam tubuh mereka. Sebagai akibatnya, logam-logam ini akan terus ada di sepanjang rantai makanan. Hal ini disebabkan karena predator pada satu trofik level makan mangsa mereka dari trofik level yang lebih rendah yang telah tercemar (Said, 2014).

II.2.3 Air Asam Tambang (AAT)

Air merupakan sumber daya alam yang diperlukan untuk hajat hidup orang banyak, bahkan oleh semua makhluk hidup. Oleh karena itu sumber daya air tersebut harus dilindungi agar tetap dapat dimanfaatkan dengan baik oleh manusia dan makhluk hidup lainnya. Pemanfaatan air untuk berbagai kepentingan harus dilakukan secara bijaksana dengan memperhitungkan kepentingan generasi sekarang dan generasi mendatang. Kerusakan dan penurunan sumber daya air terus terjadi dan semakin parah dari tahun ke tahun. Langkah-langkah untuk mengatasi permasalahan sudah banyak dilakukan, namun kerusakan tetap saja berjalan dengan kecepatan yang tidak terduga. Pencemaran air saat ini terjadi hampir di seluruh kota besar dunia dan sudah berlangsung ratusan tahun. Pengalaman negara maju ketika revolusi industri 150 tahun lalu, memberi rasa optimis bahwa masih ada kesempatan untuk Indonesia memperbaiki pencemaran yang terjadi. Dalam penanggulangan pencemaran air, perlu dikenali terlebih dahulu sumber

pencemaran, material pencemaran, sifat dan karakter bahan pencemar, kemudian dilakukan pengambilan keputusan untuk mengatasi pencemaran (Widiyanto, *et al.*, 2015). Pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan komponen lainnya ke dalam air oleh kegiatan manusia maupun secara alami, sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya (Said, 2014) .

Air asam tambang adalah air yang terkontaminasi dengan limbah pertambangan dengan kadar sulfat yang tinggi. Menurunnya pH akibat kandungan sulfat pada AAT memberikan serangkaian dampak pada lingkungan. Dampak penurunan pH yang paling penting adalah meningkatnya kelarutan logam-logam termasuk logam berat. Logam merupakan kofaktor dan aktivator enzim-enzim, sehingga apabila masuk ke dalam tubuh hewan, tumbuhan, mikroba dan manusia akan mengacaukan sistem metabolisme. Oleh karena itu, kandungan logam harus menjadi perhatian utama pada pengelolaan air asam tambang (Widyati, 2011).

Air asam tambang (AAT) terjadi bila batuan yang mengandung mineral sulfida (misalnya pirit) terbuka atau terhampar mengalami kontak dengan udara dan air sehingga terjadi oksidasi. Proses oksidasi batuan atau mineral sulfida dipercepat dengan adanya bakteri. AAT dihasilkan dari dinding-dinding batuan yang terpapar seperti lubang tambang, batuan limbah yang ditumpuk, dan material yang ditimbun. Adanya air permukaan akibat hujan akan memindahkan air asam, logam-logam, dan sulfat-larut ke air bawah tanah dan air permukaan (Riwandi dan Ali, 2007).

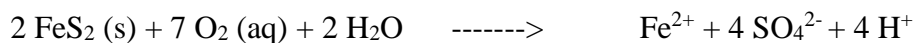
Curah hujan yang tinggi dan sisa bahan galian yang tersusun mineral sulfidik merupakan penyebab utama tingginya fenomena air asam tambang. Air asam tambang mengakibatkan air di sekitar lokasi pertambangan tidak layak untuk

mendukung kehidupan masyarakat sekitar. Air asam tambang ditandai dengan berubahnya warna air menjadi merah jingga karena ion ferro (Fe^{2+}) yang terdapat pada mineral pirit teroksidasi menjadi ferri (Fe^{3+}). Air asam tambang umumnya mengandung beberapa logam berat seperti Fe, Mn, Zn, dan Cu serta pH yang sangat rendah (Widyati, 2009).

Secara fisik, aktivitas penyingkiran lapisan tanah di atas batubara sekaligus menggusur kantong-kantong aliran air seperti sungai dan mata air di lokasi tersebut. Secara kimia, formasi batuan tempat terbentuknya batubara di Indonesia umumnya tersusun atas mineral sulfidik. Mineral yang tersisa (baik *overburden* maupun sisa galian) ketika bersinggungan dengan udara dan air akan cepat teroksidasi menghasilkan asam sulfat, asam sulfat merupakan asam kuat, maka akibatnya pH tanah dan air akan mengalami penurunan secara drastis (Widyati, 2009).

AAT yang terbentuk dari oksidasi mineral mengandung besi sulfur, seperti pirit (FeS_2) dan pirotit (FeS) oleh oksidator seperti air, oksigen dan karbondioksida dengan bantuan katalis bakteri dan produk-produk lain sebagai akibat dari reaksi oksidasi tersebut. Reaksi tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan reaksi seperti berikut (Fahrudin, 2010):

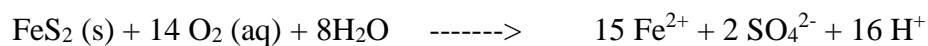
- a. Oksidasi dari mineral sulfida. Proses oksidasi mineral sulfida dapat terjadi akibat adanya udara, air, dan bakteri *Thiobacillus ferrooxidans*. Reaksinya terbentuk adalah:



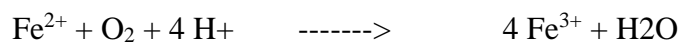
Dampak lingkungannya sedikit asam (pH menurun). Pada kondisi ini memicu perkembangan bakteri *Thiobacillus ferrooxidans*, sumber energi diperoleh

bakteri tersebut dari senyawa anorganik yang mengandung S dan Fe, akibatnya terjadi pirit.

- b. *Thiobacillus ferrooxidans* mempercepat laju reaksi secara kimia oksidasi pirit dari 500.000 – 1.000.000 kali. Ion Fe^{3+} merupakan oksidan yang sangat kuat sehingga reaksi yang terbentuk adalah



- c. Reaksi tersebut menyebabkan pH turun drastis dan terbentuk :



(merah jingga)

Ion Fe^{3+} yang dihasilkan digunakan lagi oleh *Thiobacillus ferrooxidans* membentuk AAT secara berulang, sehingga sekali saja AAT muncul, maka tidak dapat dihentikan hingga ratusan tahun (Fahrudin, 2010).

Reaksi tersebut terlihat bahwa logam (Fe) akan terakumulasi baik pada tanah maupun air. Logam-logam lain juga dijumpai selain Fe seperti Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, dan lain-lain juga terdapat. Hal ini karena mineral umum yang terdapat pada lahan bekas tambang batubara selain pirit (FeS_2) antara lain spalerit (ZnS), galena (PbS), milerit (NiS), grinokit (CdS), covelit (CuS), kalkopirit (CuFeS), dan lain-lain. Air asam tambang inilah yang mengakibatkan lahan bekas tambang batubara memerlukan penanganan yang serius terutama untuk memperbaiki tingkat kemasaman dan menurunkan akumulasi logam-logam (Widyati, 2009)

Diantara batuan sedimen yang mengandung lapisan batubara terdapat juga lapisan-lapisan batuan yang memiliki potensi tinggi untuk menghasilkan air asam batuan (*acid rock drainage* atau ARD). Permukaan batuan yang teroksidasi oleh

oksigen dan kemudian terkena air melalui hujan atau aliran akan menghasilkan air asam batuan (Said, 2014).

Kecepatan pembentukan AAT ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, baik internal maupun eksternal. Faktor internal meliputi karakteristik batuan dan bentuk sulfur, sedangkan faktor internal adalah suhu, pH dan populasi bakteri pengoksidasi sulfur. Jika terbentuknya AAT dapat dikatakan *unstoppable* dan untuk mengatasinya diperlukan waktu yang sangat lama sampai ratusan tahun, karena itu perlu dilakukan pencegahan atau pengendalian terjadinya AAT (Fahrudin, 2010)

Alkalinitas merupakan kebalikan (penetral) proses pengasaman. Alkalinitas sebagian besar terjadi karena adanya mineral karbonat, yaitu kalsit dan dolomit. Mineral-mineral silikat (seperti kuarsa, kaolinite, illite, smectite, muscovite) juga dapat menetralkan pengasaman, meskipun kecepatan reaksinya jauh lebih lambat dibandingkan dengan mineral karbonat (Said, 2014).

Air asam tambang dapat dikelompokkan ke dalam 5 tipe yaitu berdasarkan kadar keasaman dan kandungan zat terlarut didalamnya (Said, 2014):

- a. Air Tambang Tipe 1 adalah air tambang yang mengandung Fe, Al, Mn dan logam lainnya, asam (H^+), mengandung alkalinitas dan oksigen dengan konsentrasi yang tinggi. Air tambang tipe ini disebut AAT. Air asam tambang mungkin juga merujuk pada air yang mempunyai $pH < 6$ dan mengandung keasaman bersih (*net acidity*), yaitu keasamannya lebih besar daripada alkalinitasnya.
- b. Air Tambang Tipe 2 adalah air tambang yang mempunyai kandungan zat padat terlarut yang tinggi yakni mengandung besi ferro dan Mn yang tinggi, sedikit

atau tanpa mengandung oksigen dan $\text{pH} > 6$. Pada kondisi teroksidasi, pH air tipe ini dapat turun secara tajam sehingga berubah menjadi air tipe 1.

- c. Air Tambang Tipe 3 adalah air tambang yang mengandung zat padat terlarut dengan konsentrasi sedang sampai tinggi, mengandung besi ferro dan Mn dengan konsentrasi rendah sampai sedang atau sedikit mengandung oksigen, $\text{pH} > 6$ dan alkalinitas lebih besar dari keasaman (*acidity*). Umumnya disebut juga dengan air tambang alkali (*alkaline mine drainage*). Pada kondisi teroksidasi, asam yang terbentuk dari hidrolisa logam dan reaksi pengendapan akan dinetralkan oleh senyawa alkali yang sudah terdapat di dalam air.
- d. Air Tambang Tipe 4 adalah air asam tambang tipe 1 yang dinetralkan hingga pH -nya > 6 dan mengandung partikel tersuspensi dengan konsentrasi yang tinggi. Pengendapan hidroksida logam di dalam air belum terjadi. Dengan waktu tinggal yang cukup di dalam kolam, maka partikel tersuspensi akan mengendap.
- e. Air Tambang Tipe 5 adalah air asam tambang yang telah dinetralkan sehingga pH -nya > 6 dan mengandung zat padat terlarut dengan konsentrasi yang tinggi. Setelah hampir seluruh hidroksida logam diendapkan di dalam kolam pengendap, kation utama yang masih tertinggal di dalam air dengan konsentrasi yang tinggi umumnya adalah kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) terlarut. Anion terlarut seperti bikarbonat dan sulfat masih tertinggal di dalam air. Jika pada proses netralisasi mengalami kekurangan alkalinitas, air tambang tipe 5 ini tidak akan terbentuk.

Tipe lain dari air tambang terjadi dari tambang yang mengandung sedikit sulfida dan karbonat dengan konsentrasi rendah sampai sedang. Air tipe ini

biasanya mendekati pH netral, spesifik konduktan rendah ($< 100 \mu\text{S}/\text{mm}$) dan alkalinitas mendekati setimbang. Air tipe ini dikelompokkan sebagai air netral atau inert. Di antara tipe-tipe air tambang di atas terdapat kemungkinan adanya tipe transisi sehingga pengambilan data yang sesuai dan analisa konsentrasi logam, pH air, serta status oksigen perlu dilakukan untuk menentukan tipe atau karakteristik air tambang (Said, 2014).

II.2.4 Pengolahan Air Asam Tambang (AAT)

Pengolahan air asam tambang dapat dilakukan dengan cara netralisasi, yaitu dengan menambahkan bahan kimia yang bersifat basa. Bahan kimia yang umum digunakan untuk netralisasi ini adalah kapur (CaCO_3), hydrated lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), soda-ash (Na_2CO_3), atau caustic soda (NaOH) (Said, 2014).

Secara umum ada dua metoda yang dapat digunakan untuk pengolahan air asam tambang, yaitu teknologi pengolahan aktif dan teknologi pengolahan pasif. Pada teknologi pengolahan aktif, proses-proses yang digunakan adalah netralisasi, aerasi dan pengendapan. Netralisasi adalah proses penambahan bahan kimia untuk menetralkan pH air asam tambang agar proses penghilangan besi di air dapat berjalan dengan baik. Proses aerasi adalah penambahan oksigen dalam air asam tambang agar besi yang terdapat di dalam air asam tambang bereaksi dengan oksigen dimana selanjutnya Fe akan dipisahkan melalui proses pengendapan. Sementara itu, pada teknologi pengolahan secara pasif, air diolah tanpa membutuhkan bahan kimia dan hanya menggunakan proses kimia dan biologi yang terjadi di alam. Beberapa teknologi pengolahan pasif untuk air asam tambang yang dapat digunakan adalah rawa alamiah (*natural wetland*), rawa buatan (*constructed wetland*), saluran anoksik batu kapur (*anoxic limestone drain, ALD*), Sistem aliran

vertikal (*vertical flow system*), dan saluran terbuka batu kapur (*open limestone channe*, OLC) (Said, 2014).

Proses pengolahan AAT secara biologis, perlu dilakukan secara lebih efisien dan ekonomis yaitu dengan menambahkan bahan organik dari sedimen lahan basah atau *wetland*. Bahan organik ini secara alami terdapat banyak BPS, sehingga tidak perlu lagi diinokulasi mikroba dari luar, serta penambahan nutrisi. Kandungan bahan organik yang tinggi dalam sedimen *wetland* menyediakan lingkungan yang ideal untuk populasi bakteri pereduksi sulfat (May, 2007).

II.3 Bioremediasi

Bioremediasi merupakan penggunaan mikroorganisme yang telah dipilih untuk ditumbuhkan pada polutan tertentu sebagai upaya untuk menurunkan kadar polutan tersebut. Pada saat proses bioremediasi berlangsung, enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi struktur polutan beracun menjadi tidak kompleks sehingga menjadi metabolit yang tidak beracun dan berbahaya. Pengolahan air tercemar secara biologi pada prinsipnya adalah meniru proses alami *self purification* di sungai dalam mendegradasi polutan melalui peranan mikroorganisme (Priadie, 2012).

Salah satu teknik yang dapat digunakan dalam pemulihan ekosistem yang tercemar oleh logam berat adalah bioremediasi. Pemulihan ekosistem diartikan sebagai suatu proses untuk memanipulasi ekosistem (tanah, tanaman dan kehidupan didalamnya) untuk mencapai pola dengan komposisi, struktur dan fungsi yang sama dengan kondisi sebelumnya. Pengelolaan AAT dengan bioremediasi atau dengan metode pasif ini tentunya akan lebih ramah lingkungan dan menggunakan biaya

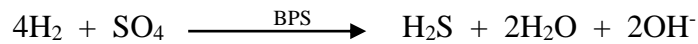
yang lebih minim walaupun waktu yang dibutuhkan akan lebih lama dari metode aktif (Moertinah, 2010).

II.4 Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS)

Di alam dikenal beragam bakteri yang memanfaatkan senyawa anorganik sebagai elektron donor atau elektron akseptor dalam aktivitas metabolismenya, salah satunya adalah bakteri pereduksi sulfat. Bakteri pereduksi sulfat memanfaatkan ion sulfur dalam bentuk sulfat (SO_4^{2-}), tiosulfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) dan sulfit (SO_3^{2-}) sebagai akseptor elektron terminal dalam respirasi metabolismenya, yang kemudian direduksi menjadi sulfida. Spesies bakteri pereduksi sulfat yang paling banyak ditemukan adalah dalam sedimen laut karena kandungan sulfat cukup tinggi. Habitat pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat cukup luas. Selain di lautan, bakteri ini juga ditemukan di lahan sawah dan perairan darat. Mengingat bakteri ini merupakan bakteri anaerob, bakteri pereduksi sulfat lebih banyak ditemukan pada lingkungan anoksik, terutama di bagian bawah sedimen, jumlah dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat meningkat dengan ketebalan lapisan sedimen, Namun demikian, ada kelompok bakteri pereduksi sulfat yang mampu tumbuh pada kondisi oksik (Yusron, 2009).

Bakteri pereduksi sulfat adalah kelompok heterotrofik yang menggunakan senyawa organik sederhana sebagai sumber karbon, terdapat terutama dalam lumpur kotor yang terkandung bahan-bahan organik dan penguraian anaerob. Bakteri ini hidup dalam sedimen dengan meningkatkan pH dari keadaan asam dengan proses metabolismenya. Pada proses reduksi ion sulfat selain dihasilkan hidrogen sulfida (H_2S) juga dilepaskan ion hidroksil (OH^-). Semakin banyak ion sulfat direduksi maka semakin banyak pula ion hidroksil yang dihasilkan, sehingga

pH lingkungan semakin meningkat, sebagaimana persamaan berikut (Fahrudin, 2009):



Kelompok bakteri yang melakukan reapiisasi sulfat sangat bermacam macam dengan substrat dan siklus yang berbeda-beda. Bakteri ini dikelompokkan dalam subkelompok (Suhartanti, 2004):

1. Kelompok yang dapat tumbuh dengan adanya laktat dan asam lainnya dan rnenggunakan molekul hidrogen. Mereka mengoksidasi donor -H dan menghasilkan asam asetat. Yang termasuk kelompok ini adalah *Desulfovibrio* dan *Desulfotomaculum*.
2. Dengan mengisolasi beberapa species bakteri pengguna asetat, asam lemak rantai panjang dan pendek, alkohol, senyawa aromatik, dan molekul hidrogen sebagai donor elektron. Bakteri yang termasuk dalam kelompok ini adalah *Desulfotomaculum acetooksidan*, *Desulfobacter*, *Desulfonema* dan lainnya.
3. Ada beberapa jenis tumbuh secara autotrof dengan molekul hidrogen dan tiosulfat. Bakteri yang termasuk kelompok ini yaitu strain dari *Desulfovibrio*, *Desulfobacteriunt*, *Desulfococcus*, *Desulfobacter*, dan *Desulfutomaculum* seperti lralnya *Archaeoglobus* yang termasuk archaebakeria yang bersifat hipertermofil.
4. Isolat bakteri *Desulfovibrio* dismutans yang menghasilkan energi hasil perubahan tiosulfat atao sulfit menjadi sulfat dan H₂S. Beberapa strain tumbuh secara autotrof atau dengan adanya asetat secara khemolitotrof. Mereka melakukan metabolisme yang dikenal dengan nama fermentasi inorganik.

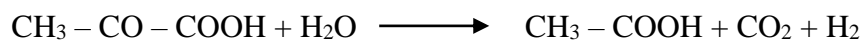
Kelompok produksi sulfat, seperti *Desulfovibrio vulgaris*, tidak mempunyai siklus TCA secara lengkap, dan mengeluarkan asetat. Beberapa spesies dapat menggunakan asetat untuk di oksidasi melalui siklus sitrat (TCA) (*Desulfobacter postgatei*), dan yang yang lainnya melakukan oksidasi melalui jalur asetil-CoA (*Desulfobacterium*, *Desulfosarcina*, *Desulfococcus*, *Desulfotomaculum*). Strains melakukan beberapa jalur oksidasi asetat untuk fiksasi CO₂. Dengan mengisolasi bakteri dapat menggunakan asetat dan asam lemak rantai panjang termasuk senyawa-senyawa aromatik (Suhartanti, 2004).

Energi metabolisme yang dihasilkan melalui fosforilasi tranpor elektron diperoleh dari asimilasi substrat organik. Beberapa strain mensintesa bagian-bagian sel dari asetat dan karbon dioksida dimana molekul hidrogen berfungsi sebagai donor hidrogen. Beberapa senyawa organik selama oksidasi dengan donor hidrogen inorganik dapat melakukan *khemolithoheterotrof*. Fiksasi CO₂ melalui siklus Calvin dapat dilakukan melalui jalurasetil-CoA (Suhartanti, 2004).

Beberapa bakteri perombak sulfat mereka dapat melakukan metabolisme laktat atau piruvat tanpa adanya sulfat. Oksidasi piruvat melalui reaksi:



Melalui reaksi fermentasi dan menghasilkan hidrogen:



Bakteri pereduksi sulfat sangat mampu melakuakn fermentasi laktat. Untuk kultur *enrichment* BPS, medium harus mengandung nutrisi sebagai donor hidrogen, substrat asimilasi, garam mineral dan sulfat, kondisi harus anaerob dengan potensial redoks (Eo',- 200mV) (Suhartanti, 2004).

Adanya tambahan bahan organik pada bakteri pereduksi sulfat dalam peningkatan pH air asam tambang juga memiliki pengaruh yang signifikan. Bahan organik dapat mempercepat peningkatan pH pada air asam tambang akibat adanya unsur-unsur yang tercukupi dan dibutuhkan oleh bakteri pereduksi sulfat. Namun bahan organik yang tersedia untuk bakteri pereduksi sulfat harus telah mengalami mineralisasi atau bukan merupakan bahan mentah agar lebih mudah digunakan. Hal ini dibuktikan dari penelitian yang membandingkan laju penurunan pH air asam tambang dengan penambahan serbuk gergaji dan kompos sebagai perlakuan, hasil yang diperoleh memperlihatkan nilai pH tertinggi pada air asam tambang yang diberi perlakuan (Sandrawati, *et al.*, 2019). Di alam bakteri pereduksi sulfat sering berasosiasi dengan bakteri pereduksi besi (BPB) dalam melaksanakan bioremediasi lingkungan. Keduanya dapat dijumpai di lingkungan tanpa oksigen. Bakteri ini menggunakan besi sebagai akseptor elektron terminal dalam respirasinya (Luef, *et al.*, 2013).