

SKRIPSI

**PENGARUH PERLAKUAN SEDIMEN BAKAU DAN BIOCHAR DARI
TEMPURUNG KELAPA DALAM MENURUNKAN KADAR LOGAM
MANGAN (Mn) DAN SULFAT AIR ASAM TAMBANG**

SATRIANI

H041 19 1015



**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**PENGARUH PERLAKUAN SEDIMEN BAKAU DAN BIOCHAR DARI
TEMPURUNG KELAPA DALAM MENURUNKAN KADAR LOGAM
MANGAN (Mn) DAN SULFAT AIR ASAM TAMBANG**

SKRIPSI



*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

SATRIANI

H041 19 1015

**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2023

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PERLAKUAN SEDIMEN BAKAU DAN BIOCHAR DARI
TEMPURUNG KELAPA DALAM MENURUNKAN KADAR LOGAM
MANGAN (Mn) DAN SULFAT AIR ASAM TAMBANG**

Disusun dan diajukan oleh:

SATRIANI

H041 19 1015

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian sarjana Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal 04/08/2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

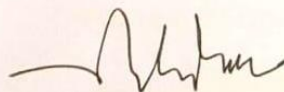
Menyetujui,

Pembimbing Utama



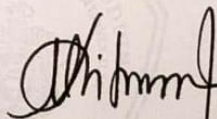
Prof. Dr. Fahuudin, M.Si
NIP. 196509151991011002

Pembimbing Pertama



Dr. Nur Haedar, M.Si
NIP. 196801291997022001

Ketua Program Studi,



Dr. Magdalena Litaay, M.Sc
NIP. 196409291989032002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama: Satriani
NIM: H041191015
Program Studi: Biologi
Jenjang: S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Pengaruh Perlakuan Sedimen Bakau dan Biochar dari Tempurung Kelapa dalam
Menurunkan Kadar Logam Mangan (Mn) dan Sulfat Air Asam Tambang

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain, dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 07 Agustus 2023

Yang menyatakan


Satriani

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. atas segala berkah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul **“Pengaruh Perlakuan Sedimen Bakau dan Biochar dari Tempurung Kelapa dalam Menurunkan Kadar Logam Mangan (Mn) dan Sulfat Air Asam Tambang”**. Shalawat serta salam tak lupa penulis curahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang mengantarkan manusia dari zaman kegelapan ke zaman yang terang benderang ini.

Skripsi ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan program Pendidikan Sarjana (S1) di Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam pelaksanaan penelitian hingga penyusunan skripsi ini, masih banyak kekurangan yang tersirat didalamnya. Sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk dapat menyempurnakan penelitian ini.

Ucapan terimakasih sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada kedua orang tua yang penulis sayangi dan kasihi Ayahanda Taje dan Ibunda (Alm) Murni yang telah memberikan kasih sayang, ridho dan cinta kasih yang tiada terhingga. Terimakasih atas dukungan dan kepercayaan yang telah Ibu dan Bapak berikan, telah merawat dari kecil hingga sekarang, mengajarkan arti hidup, menjadi pendengar segala keluh kesah. Tidak lupa pula ucapan terimakasih kepada saudara-saudara penulis yang penulis cintai terimakasih atas doa, motivasi, dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Ucapan terimakasih dan penghargaan sebesar-besarnya penulis sampaikan juga kepada Bapak dosen pembimbing yaitu Bapak Prof. Dr. Fahrudin, M.Si. dan Ibu Dr. Nurhaedar, M.Si. yang senantiasa membimbing dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan penelitian hingga penyusunan tugas akhir. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah Bapak dan Ibu berikan.

Selain itu, tersusunnya skripsi ini tidak lepas dari doa dan dukungan berbagai pihak dan untuk itu ucapan terimakasih penulis juga di sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaludin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.
2. Bapak Dr. Eng. Amiruddin, S.Si, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf yang telah membantu penulis dalam hal akademik dan administrasi.
3. Ibu Dr. Magdalena Litaay, M.Sc. selaku Ketua Progran Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, sekaligus selaku penguji terimakasih atas ilmu, masukan, dan dukungannya.
4. Ibu Dr. Irma Andriani, S.Pi., M.Si. selaku dosen Penasehat Akademik (PA) yang telah banyak membimbing penulis dalam menjalani proses perkuliahan.
5. Ibu Helmy Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku penguji terima kasih atas ilmu, masukan, saran dan dukungannya.
6. Ibu/Bapak Dosen Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, pesan moral dan pembelajaran etika kepada mahasiswanya.

7. Kak Fuad Gani S.Si, Faisal dan Nur Husnul, Zulfikar Lukman yang telah membimbing dan membantu penulis berupa kritik dan sarannya selama penelitian di laboratorium Mikrobiologi.
8. Sahabat yang penulis sayangi Aurelia Salsabila, Noer Zakiah Derajat Sam, Nurul Faradhillah, dan Lusiana yang selalu ada saat suka dan duka untuk penulis dan memberikan dukungan.
9. Sepupu yang penulis sayangi Astri Febriyanti, Muhammad Amin, Milda Putri Avriska terima kasih atas semangat dan dukungan kepada penulis.
10. Teman-teman Biologi Angkatan 2019, Biot19ris yang tidak bisa penulis disebutkan satu persatu terima kasih atas segala momen indah sejak awal masa studi.
11. Teman-teman, kakak-kakak dan adik-adik di HIMBIO FMIPA dan di KM FMIPA UNHAS. Terima kasih atas segala ilmu, nasehat, pengalaman, dan hangatnya rasa kekeluargaan selama penulis menjalani roda organisasi.
12. Teman-teman KKN Gel. 108 Posko Campaga 2, terima kasih atas doa, dukungan, dan kenangan yang diukir bersama selama menjalani KKN di Kab. Bantaeng.

Penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Makassar, 07 Agustus 2023

Satriani

ABSTRAK

Limbah air asam tambang (AAT) merupakan masalah besar di dunia pertambangan yang dapat menyebabkan kerusakan jangka panjang pada tanah, air dan keanekaragaman hayati. Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh perlakuan sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa dalam menurunkan kadar logam mangan (Mn) dan sulfat air asam tambang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh BPS (Bakteri Pereduksi sulfat) pada sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa dalam menurunkan kadar logam mangan, meningkatkan pH, menurunkan kadar sulfat, dan mengetahui jumlah populasi mikroba. Kadar logam mangan diukur dengan menggunakan metode SSA (Spektrofotometri Serapan Atom), kadar sulfat diukur menggunakan metode gravimetri, perubahan pH diukur menggunakan pH meter, dan total mikroorganisme dihitung dengan metode SPC (*Standar plate count*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sedimen bakau dan biochar tempurung kelapa mampu menurunkan kadar logam mangan (Mn) pada AAT dalam waktu 30 hari yaitu pada P1 dengan kadar akhir sebesar 0,12 ppm lebih baik dibandingkan dengan P2 sebesar 0,26 ppm, P3 sebesar 0,36 ppm, dan P4 sebesar 0,68 ppm. Serta dapat menurunkan kadar sulfat pada AAT dalam waktu 30 hari yaitu pada P1 dengan kadar akhir sebesar 98 ppm lebih baik dibandingkan dengan P2 sebesar 135 ppm, P3 sebesar 182 ppm, dan P4 sebesar 204,72 ppm. Pemberian sedimen bakau dan biochar tempurung kelapa juga mampu meningkatkan pH AAT dalam waktu 30 hari pada P1 sebesar 7,15, P2 sebesar 6,4, P3 sebesar 5,8 dan P4 sebesar 2,52. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa jumlah mikroba pada perlakuan mengalami peningkatan hingga hari ke-20 inkubasi secara berturut-turut adalah P1 sebanyak $3,9 \times 10^{11}$ CFU/mL, P2 sebanyak $2,5 \times 10^8$ CFU/mL, P3 sebanyak $9,0 \times 10^5$ CFU/mL, dan P4 sebanyak $3,0 \times 10^4$ CFU/mL.

Kata Kunci: Air Asam Tambang, Sedimen, Bakteri Pereduksi Sulfat, Biochar.

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) waste is a major problem in mining that can cause long-term damage to soil, water and biodiversity. Research has been conducted on the effect of mangrove sediment treatment and biochar from coconut shells in reducing metal manganese (Mn) and sulfate levels of acid mine drainage. This study aims to determine the effect of SRB (Sulfate Reducing Bacteria) on mangrove sediments and biochar from coconut shells in reducing manganese metal levels, increasing pH, reducing sulfate levels, and knowing the number of microbial populations. Manganese metal levels were measured by using the AAS (Atomic Absorption Spectrophotometry) method, sulfate levels were measured by using the gravimetric method, pH changes were measured by using a pH meter, and total microorganisms were counted by using the SPC (Standard plate count) method. The results showed that the use of mangrove sediment and coconut shell biochar was able to reduce manganese (Mn) metal levels in AMD within 30 days, namely in P1 with a final level of 0.12 ppm better than P2 by 0.26 ppm, P3 by 0.36 ppm, and P4 by 0.68 ppm. And can reduce sulfate levels in AMD within 30 days, namely in P1 with a final level of 98 ppm better than P2 by 135 ppm, P3 by 182 ppm, and P4 by 204.72 ppm. The provision of mangrove sediment and coconut shell biochar was also able to increase the pH of AMD within 30 days in P1 by 7.15, P2 by 6.4, P3 by 5.8 and P4 by 2.52. This study also showed that the number of microbes in the treatment increased until the 20 days of incubation successively P1 by 3.9×10^{11} CFU/mL, P2 by 2.5×10^8 CFU/mL, P3 by 9.0×10^5 CFU/mL, and P4 by 3.0×10^4 CFU/mL.

Keywords: Acid Mine Drainage, Sediment, Sulfate Reducing Bacteria, Biochar.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
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	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Pencemaran Lingkungan	6
II.1.1 Pencemaran Limbah Pertambangan	7
II.2 Air Asam Tambang (AAT)	10
II.2.1 Dampak Air Asam Tambang.....	13
II.2.2 Penanggulangan Air Asam Tambang	15

II.2.3 Pencemaran Logam Berat Mangan.....	17
II.3 Sedimen Wetland	18
II.3.1 Peranan Sedimen Wetland	18
II.3.2 Sedimen Bakau	20
II.4 Bakteri Pereduksi Sulfat	22
II.4.1 Peranan Bakteri Pereduksi Sulfat	24
II.5 Biochar Tempurung Kelapa	26
II.5.1 Arang Tempurung Kelapa.....	26
II.5.2 Aktivasi Arang Tempurung Kelapa.....	27
III METODE PENELITIAN	29
III.1 Alat	29
III.2 Bahan.....	29
III.3 Prosedur Penelitian.....	29
III.3.1 Sterilisasi Alat	29
III.3.2 Pengambilan Sampel	30
III.3.3 Pembuatan Air Asam Tambang (AAT).....	39
III.3.4 Aktivasi Arang Tempurung Kelapa	30
III.3.5 Pembuatan Perlakuan	31
A. Analisis Kandungan Logam Berat Mangan (Mn)	32
B. Pengukuran Kadar Sulfat	32
C. Pengukuran pH.....	32
D. Menghitung Total Mikroba dengan Metode <i>Standart Plate Count</i>	33
III.4 Analisis Data	34

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
IV.1 Perubahan Fisik Air Asam Tambang	35
IV.2 Pengukuran Kadar Sulfat	37
IV.3 Pengukuran Kadar Logam Berat Mangan (Mn)	39
IV.4 Perhitungan pH	43
IV.4 Perhitungan Total Mikroba	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	49
V.1 Kesimpulan	49
V.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	55

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Hasil pengukuran sulfat.....	55
2. Hasil pengukuran logam.....	55
3. Hasil pengukuran pH	55
4. Hasil perhitungan total mikroba	55

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Tempurung kelapa dan arang tempurung kelapa	26
2. Biochar tempurung kelapa.....	27
3. Kondisi fisik air asam tambang hari ke-0.....	35
4. Kondisi fisik air asam tambang hari ke-30.....	36
5. Hasil pengukuran kadar sulfat	37
6. Hasil pengukuran kadar mangan.....	40
7. Mekanisme penyerapan logam oleh biochar	42
8. Hasil pengukuran pH	43
9. Hasil perhitungan total mikroba	46

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Tabel hasil pengukuran kadar sulfat, mangan, pH, perhitungan total mikroba.....	55
2. Foto pengambilan sampel.....	56
3. Foto pembuatan perlakuan AAT.....	56
4. Pembuatan media dan persiapan pengerjaan	57
5. Pengenceran dan isolasi mikroba	57
6. Perhitungan total mikroba, pengukuran kadar logam mn, sulfat, dan pH.....	57

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia yang memiliki potensi sumber daya alam pertambangan yang sangat potensial, mulai dari emas, biji nikel, biji besi, pasir besi, batubara, minyak dan gas bumi. Data dari *Indonesian Mining Association* menjelaskan bahwa produksi batubara di Indonesia mencapai posisi ke-6 sebagai produsen dengan jumlah produksi yaitu mencapai 246 juta ton. sehingga berkontribusi besar dalam perekonomian negara. Akan tetapi, seiring dengan meningkatnya aktivitas pertambangan, pada beberapa daerah di Indonesia muncul permasalahan pencemaran lingkungan akibat dari berbagai jenis limbah yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan (Hapsari, 2018).

Limbah Air Asam Tambang (AAT) merupakan masalah besar di dunia pertambangan, terutama pada wilayah pertambangan batubara dan emas. Hal tersebut dikarenakan limbah AAT yang dihasilkan sulit untuk dikendalikan dan perawatan juga membutuhkan biaya tinggi. Masalah AAT dapat menyebabkan kerusakan jangka panjang pada tanah, air dan keanekaragaman hayati. AAT terbentuk karena terjadinya reaksi antara mineral sulfida yang terkandung dalam batuan yang bersentuhan dengan udara dan air. Sumber utama AAT berasal dari penambangan bawah tanah, cadangan bijih, *tailing* serta pembuangan limbah tambang (Polawan, 2017).

Menurut Suryatmana *et al.*, (2020) air asam tambang memiliki karakteristik yaitu memiliki pH yang sangat rendah berkisar 2 sampai 4 yang

dapat menyebabkan AAT memiliki kemampuan untuk meningkatkan kelarutan berbagai logam seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan aluminium (Al). pH yang rendah dan kandungan logam-logam yang tinggi pada perairan dapat menyebabkan penurunan produktivitas biologis dalam ekosistem akuatik. Pada kondisi yang sangat parah, AAT tidak aman untuk dikonsumsi dan digunakan untuk keperluan lain seperti irigasi dan industri.

Menurut Kiswanto *et al.*, (2020) konsentrasi mangan (Mn) yang lebih tinggi dapat ditemukan di perairan dengan tingkat pH rendah. Mangan adalah logam berat bersifat esensial yang berfungsi membangun struktur tulang yang sehat, metabolisme tulang dan membantu menciptakan enzim. Mangan bersifat korosi jika melebihi batas sehingga mengakibatkan tubuh mudah terkena penyakit. Mangan adalah metal berwarna kelabu-kemerahan, di alam mangan umumnya ditemui dalam bentuk senyawa dengan berbagai macam valensi. Air yang mengandung mangan berlebih menimbulkan rasa, warna (coklat/ungu/hitam), dan kekeruhan. Kandungan mangan yang diizinkan dalam air yang digunakan untuk keperluan domestik yaitu di bawah 0,05 mg/l (Febrina dan Ayuna, 2015).

Penanggulangan AAT dapat dibedakan menjadi metode aktif dan pasif. Metode aktif yakni aplikasi bahan penetral seperti kapur. Metode ini dinilai dapat meningkatkan nilai pH dalam waktu yang singkat. Namun, metode ini banyak dikeluhkan karena memerlukan biaya yang tinggi dan perawatan yang intensif. Oleh karena itu, metode aktif ini sudah mulai ditinggalkan. Sedangkan metode pasif menawarkan sistem yang dapat bekerja tanpa penambahan input dengan

frekuensi yang tinggi. Metode ini dinilai tidak memerlukan perawatan intensif dibandingkan perlakuan aktif. Penanganan AAT secara pasif digolongkan ke dalam empat metode, yaitu metode *Aerobic Wetlands*, *Anaerobic Wetlands*, *Anoxic Limestone Drains*, *Vertical Flow System* (Zipper *et. al.*, 2011).

Salah satu alternatif dalam pengolahan AAT secara biologis yaitu dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat (BPS) atau *Sulphate Reducing Bacteria* (SRB). Bakteri ini biasanya terdapat pada substrat-substrat berlumpur seperti pada sedimen. 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 Yusron *et al.*, (2009). Dalam penelitian Fahrudin *et al.*, (2020) memanfaatkan aktivitas BPS yang dalam menurunkan kadar sulfat. Ion sulfat, sulfit atau thiosulfat dimanfaatkan oleh BPS sebagai aseptor elektron untuk mendapatkan energi dalam proses metabolismenya. Setelah menerima elektron ion-ion tersebut akan tereduksi menjadi sulfida.

Selain dengan menggunakan BPS, kandungan logam berat seperti besi dan mangan dalam limbah AAT juga dapat diturunkan melalui proses adsorpsi dengan menggunakan biochar atau arang aktif. Sumber bahan baku biochar terbaik adalah limbah organik khususnya limbah pertanian. Beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan karbon aktif tempurung kelapa untuk mengolah air limbah. Penelitian Rahmawanti dan Dony (2016) memanfaatkan karbon aktif dari tempurung kelapa, sudah diterapkan pengaplikasiannya untuk mengadsorpsi logam Fe, Mn dan Al hingga 20% di salah satu kelurahan di Kota Banjarmasin. Penggunaan karbon aktif tempurung kelapa merupakan alternatif lain dalam

pengelolaan air asam tambang secara aktif, di mana penerapan metode ini dilakukan dengan penambahan karbon aktif dalam air asam tambang untuk menetralkan keasaman air asam (Desiana *et al.*, 2022).

Berdasarkan uraian di atas maka perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh perlakuan sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa dalam menurunkan kadar logam mangan (Mn) dan sulfat air asam tambang.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui penurunan kadar logam berat mangan (Mn) pada AAT dengan perlakuan sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa.
2. Mengetahui penurunan kadar sulfat pada AAT dengan perlakuan sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa.
3. Mengetahui perubahan pH pada AAT dengan perlakuan sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa.
4. Menghitung total bakteri pada AAT dengan perlakuan sedimen bakau dan biochar dari tempurung kelapa.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pentingnya penanggulangan air asam tambang dengan memanfaatkan sedimen *wetland* (sedimen bakau) dengan penambahan biochar dari tempurung kelapa sebagai salah satu alternatif untuk pengolahan air asam tambang. Di samping itu juga membuktikan bahwa betapa pentingnya prinsip-prinsip biologi dalam menangani pencemaran lingkungan di alam.

I.4 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Februari-Maret 2023 di Laboratorium Mikrobiologi, Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Balai Besar Laboratorium Kesehatan Masyarakat, Makassar. Pengambilan sampel sedimen bakau dilakukan di Kera-
kera, Kecamatan Tamalanrea, Kota Makassar dan sampel air asam tambang dibuat secara sintetik. Arang tempurung kelapa diperoleh dari toko pertanian Kota Makassar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Pencemaran Lingkungan

Pencemaran lingkungan hidup adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan. Pencemaran lingkungan adalah masalah yang akan selalu dihadapi oleh sekumpulan masyarakat yang berada di suatu lingkungan tertentu. Pencemaran ini dapat berupa pencemaran udara, pencemaran air ataupun pencemaran tanah. Seiring dengan berkembangnya industri dan pembangunan yang cukup tinggi, akan semakin meningkatkan beban pencemaran. Salah satunya adalah beban limbah cair atau air buangan yang dihasilkan, yang akan menambah pencemaran pada perairan yang merupakan salah satu media pembuangan dari limbah atau buangan tersebut kebutuhannya sehingga menyebabkan peningkatan kuantitas produksi. Untuk dapat memenuhi peningkatan kuantitas produksi, maka otomatis kebutuhan penggunaan sumber daya alam juga akan meningkat, yang pada akhirnya menimbulkan beban pada lingkungan hidup seperti turunnya daya dukung lingkungan (Arnop *et al.*, 2019).

Limbah dan sampah berpotensi besar dalam pencemaran lingkungan karena menyebabkan menurunnya kualitas lingkungan hidup serta merusak ekosistem alaminya. Dampak negatif dari menurunnya kualitas lingkungan hidup, baik karena terjadinya pencemaran atau rusaknya sumber daya alam adalah timbulnya ancaman atau dampak negatif terhadap kesehatan, menurunnya nilai

estetika, kerugian ekonomi (*economic cost*), dan terganggunya sistem alami (*natural system*). Dampak negatif terhadap kesehatan masyarakat akan dirasakan dalam kurun waktu jangka panjang. Dengan tercemarnya lingkungan hidup oleh limbah dan sampah nilai estetika dari lingkungan tersebut akan menurun, lingkungan yang tercemar tersebut akan terlihat kumuh dan tidak dapat digunakan untuk kepentingan sehari-hari. Tercemarnya lingkungan juga akan mengganggu sistem alami dari lingkungan tersebut, komponen yang terdapat pada lingkungan tersebut akan menjadi rusak (Wijaya *et al.*, 2021).

II.1.1 Pencemaran Limbah Pertambangan

Aktivitas industri di beberapa daerah di Indonesia semakin meningkat, sehingga menyebabkan pencemaran lingkungan akibat berbagai jenis limbah yang dihasilkan dari kegiatan industri. Limbah industri tambang mineral umumnya menyebabkan air mempunyai kandungan sulfat yang tinggi dan pH (Purnamaningsih *et al.*, 2017). Salah satu permasalahan lingkungan dalam aktivitas penambangan batubara adalah terkait dengan Air Asam Tambang (AAT) atau *Acid Mine Drainage* (AMD). Air tersebut terbentuk sebagai hasil oksidasi dari mineral sulfida tertentu yang terkandung dalam batuan, yang bereaksi dengan oksigen di udara pada lingkungan berair. Penampakan air asam tambang di tahap awal adalah adanya air di pit tambang yang berwarna hijau (Hidayat, 2017).

Kegiatan pertambangan merupakan kegiatan usaha yang kompleks dan sangat rumit, sarat risiko, merupakan kegiatan jangka panjang, melibatkan teknologi tinggi, padat modal dan aturan regulasi yang dikeluarkan beberapa

sektor. Selain itu, karakteristik mendasar industri pertambangan adalah membuka lahan dan mengubah bentang alam sehingga mempunyai potensi merubah tatanan ekosistem suatu wilayah baik dari segi biologi, geologi dan fisik maupun tatanan sosio ekonomi dan budaya masyarakat. Keberadaan industri pertambangan batu bara dapat menimbulkan dampak terhadap lingkungan, sosial dan ekonomi masyarakat setempat. Dari sisi dampak negatifnya, pertambangan lebih sering dipahami sebagai aktivitas lebih banyak menimbulkan permasalahan daripada manfaat, mulai dari mengganggu kesehatan, konflik perebutan lahan, terjadinya kerusakan lingkungan, hingga areal bekas pertambangan yang dibiarkan menganga. Disisi lain, banyak manfaat dari kegiatan pertambangan, seperti membuka daerah terisolir, sumber pendapatan asli daerah, membuka lapangan pekerjaan sehingga merupakan sumber devisa negara (Fitriyanti, 2016).

Salah satu penyebab timbulkan pencemaran kualitas air adalah berasal dari adanya potensi air asam tambang, karena pada umumnya air asam tambang mengandung mineral sulfida yaitu *pyrite* (FeS_2). Dengan adanya kegiatan penambangan, khususnya batubara mineral sulfida tersebut (*pyrite*) terekspos oleh udara (oksigen) kemudian dengan adanya air (contohnya:air hujan), maka terbentuk air asam tambang. Selain hal tersebut adanya kandungan logam berat yang terdapat dalam batubara juga dapat menyebabkan pencemaran yang berat terhadap lingkungan. Logam berat tersebut merupakan unsur alamiah yang terkandung dalam batubara itu sendiri (Kaharapenni dan Noor, 2015).

Kegiatan pertambangan menimbulkan dampak penurunan kesuburan tanah oleh aktivitas pertambangan batubara terjadi pada kegiatan pengupasan tanah

pucuk (*top soil*) dan tanah penutup (*sub soil/overburden*). Pengupasan tanah pucuk dan tanah penutup akan merubah sifat-sifat tanah terutama sifat fisik tanah dimana susunan tanah yang terbentuk secara alamiah dengan lapisan-lapisan yang tertata rapi dari lapisan atas ke lapisan bawah akan terganggu dan terbongkar akibat pengupasan tanah tersebut. Curah hujan yang tinggi, akan memberikan pengaruh yang besar terhadap kandungan unsur hara yang terdapat di dalamnya, sebab akan terjadi pencucian unsur hara, sehingga tanah dapat kekurangan unsur hara yang dibutuhkan tanaman pada saat dilakukan revegetasi tanaman (Fitriyanti, 2016).

Aktivitas pembukaan lahan untuk penambangan menyebabkan terjadinya degradasi vegetasi akibat kegiatan pembukaan lahan, terganggunya keanekaragaman hayati terutama flora dan fauna. Limbah pertambangan biasanya tercemar asam sulfat dan senyawa besi yang dapat mengalir keluar daerah pertambangan. Air yang mengandung kedua senyawa ini akan menjadi asam. Limbah pertambangan yang bersifat asam bisa menyebabkan korosi dan melarutkan logam-logam berat sehingga air yang dicemari bersifat racun dan dapat memusnahkan kehidupan akuatik. Industri pertambangan pada pasca operasi akan meninggalkan lubang tambang dan air asam tambang (*acid mine drainage*). Limbah cair pertambangan batubara merupakan limbah yang dominan menimbulkan pencemaran lingkungan, karena adanya air asam tambang yang berbahaya dan merusak kehidupan organisme yang hidup di (Fitriyanti, 2016).

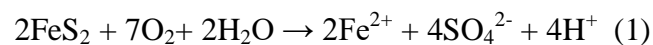
II.2 Air Asam Tambang (AAT)

Air asam tambang (AAT) atau disebut juga dengan *Acid Mine Drainage* (AMD) yaitu air rembesan (*seepage*), atau aliran (*drainage*) adalah air yang bersifat asam (tingkat keasaman yang tinggi) dan sering ditandai dengan nilai pH yang rendah (pH antara 3-5), yaitu dibawah 6, karena sesuai dengan baku mutu air pH normal adalah 6-9 sebagai hasil dari oksidasi mineral sulfida yang tersingkap oleh proses penambangan dan terkena air. Air ini terjadi akibat pengaruh oksidasi alamiah mineral sulfida (mineral belerang) yang terkandung dalam batuan yang terpapar selama penambangan. Perlu diketahui air asam tambang sebenarnya tidak terbentuk akibat kegiatan penambangan saja tetapi setiap kegiatan yang berpotensi menyebabkan terbuka dan teroksidasinya mineral sulfida akan menyebabkan terbentuknya air asam tambang. Beberapa kegiatan seperti pertanian, pembuatan jalan, drainase dan pengolahan tanah lainnya pada areal yang mengandung mineral belerang akan menghasilkan air asam, karakteristiknya pun sama dengan air asam tambang (Hidayat, 2017).

Air asam tambang dicirikan dengan rendahnya pH dan tingginya senyawa logam tertentu seperti besi (Fe), mangan (Mn), cadmium (Cd), aluminum (Al), dan sulfat. Pirit merupakan senyawa yang umum dijumpai di lokasi pertambangan. Selain pirit, juga terdapat berbagai macam mineral sulfida dalam batuan yang berpotensi membentuk air asam tambang seperti Fe_xS_x (*pyrrhotite*), PbS (*galena*), Cu_2S (*chalcocite*), CuS (*covellite*), CuFeS_2 (*chalcopyrite*), NiS (*millerite*), ZnS (*sphalerite*), dan masih banyak lagi (Hidayat, 2017).

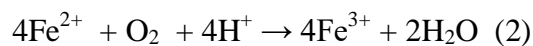
Oksidasi mineral sulfida yang menghasilkan air asam terdiri dari beberapa rangkaian reaksi kimia. Setiap mineral sulfida mempunyai kecepatan reaksi yang berbeda-beda, hal ini terjadi karena jenis mineral dan karakteristik setiap batuan juga berbeda. Sebagai contoh *marcasite* dan *framboidal pyrite* 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 (Suryadi dan Kusuma, 2019).

Reaksi kimia pertama : pelapukan *pyrite* dan proses oksidasi.



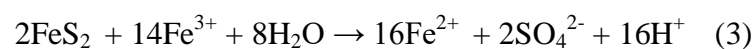
Pada reaksi di atas, oksidasi ion hidrogen dan sulfat akan menghasilkan asam sulfur dalam larutannya dan ion Fe^{2+} bebas untuk bereaksi lebih lanjut. Oksidasi ion ferro menjadi ion ferri terjadi pada pH lebih rendah.

Reaksi kimia kedua : perubahan dari ion ferro menjadi ion *ferri*.



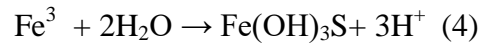
Pada pH di antara 3.5 dan 4.5, oksida besi sebagai katalis dari variasi metallogenium (*filamentous bacterium*). Pada pH dibawah 3.5 reaksi yang sama sebagai katalis besi dari bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*. Apabila ion *ferri* bertemu dengan *pyrite* maka akan terjadi reaksi melebur *pyrite*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

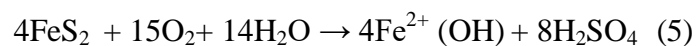


$\text{Fe}(\text{OH})_3$ mengendap dan diidentifikasi sebagai deposit dari *amorphous*, warna kuning, oranye, atau merah yang terendap di dasar aliran air dikenal sebagai “*yellow boy*” yaitu selaput seperti *jelly* berwarna merah *orange* yang melapisi dasar perairan menghambat pembentukan udara sehingga dapat membunuh organisme yang hidup di dasar perairan. Apabila pH dibawah 2.5, maka larutan kimia dicirikan dengan konsentrasi sulfat dan total iron yang tinggi dan ratio $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ juga tinggi.

Pembentukan AAT dimungkinkan karena tersedianya :

1. Mineral sulfida (sumber sulfur/asam)
2. Oksigen (dalam udara) sebagai pengoksidasi
3. Air (pencuci hasil oksidasi)

Secara keseluruhan reaksi untuk pembentukan air asam tambang melalui pelapukan pirit yaitu:



AAT yang terbentuk dari oksida mineral mengandung besi sulfur, seperti pirit (FeS_2) dan pirotit (FeS) oleh oksidator seperti air, oksigen dan karbondioksida dengan bantuan katalis bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* dan produk-produk lain sebagai akibat dari reaksi oksidasi tersebut. Asam sulfat

merupakan produk antara yang terbentuk dari proses oksidasi yang sangat berpengaruh terhadap penurunan pH. Keasaman pH air asam dapat berkembang dengan dihasilkannya besi sulfat yang merupakan oksidator kuat dan di atas pH 3 akan terhidrolisis menghasilkan oksidasi besi yang memberi warna karat pada air asam (Fahrudin, 2018).

Menurut Munawar, (2017) tingkat keasaman, komposisi dan konsentrasi logam dalam AAT tergantung kepada jenis dan jumlah mineral sulfida dan ada tidaknya material alkalin di dalam batuan. Keberadaan material alkalin dapat menjadi bahan penetral asam, sehingga dapat mengurangi jumlah AAT yang terbentuk. Sebagai contoh, batuan yang mengandung 5% mineral sulfida mungkin tidak menghasilkan asam akibat kandungan batuan kapur di dalam batuan yang dapat menetralkan seluruh asam yang dihasilkan. Sebaliknya, batuan yang hanya mengandung 2% mineral sulfida dapat menghasilkan banyak asam jika batuan tidak mengandung bahan alkalin. Jika laju pembentukan asam tetap tinggi dan potensial netralisasi di dalam batuan habis, pH akan turun di bawah 3 dan AAT semakin parah.

II.2.1 Dampak Air Asam Tambang

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.

Diperlukan biaya yang sangat besar untuk pengelolaan air asam tambang (AAT) (Suryadi dan Kusuma 2019).

Terbentuknya air asam tambang di lokasi penambangan akan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dampak negatif dari air asam tambang tersebut antara lain (Hidayat, 2017):

1. Bagi masyarakat di sekitar wilayah tambang. Logam berat yang terkandung dalam air asam tambang bersifat toksik (beracun) bagi makhluk hidup. Di dalam tubuh manusia, tembaga (Cu) dapat mengakibatkan depresi, mempengaruhi fungsi hati dan ginjal serta menimbulkan gangguan pada pembuluh darah.
2. Bagi biota perairan. Dampak negatif untuk biota perairan adalah terjadinya perubahan keanekaragaman biota perairan seperti plankton dan bentos, kehadiran bentos dalam suatu perairan dapat digunakan sebagai indikator kualitas perairan.
3. Bagi kualitas air permukaan. Terbentuknya air asam tambang hasil oksidasi pirit akan menyebabkan menurunnya kualitas air permukaan. Parameter kualitas air yang mengalami perubahan diantaranya pH, padatan terlarut, sulfat, besi dan mangan.
5. Kualitas tanah. Logam berat seperti besi, tembaga, seng terkandung dalam tanah yang asamnya banyak, yang pada dasarnya merupakan unsur hara mikro yang dibutuhkan tanaman, sementara unsur hara makro yang dibutuhkan tanaman seperti fosfor, magnesium, kalsium sangat kurang. Akibatnya keracunan pada tanaman karena kelebihan unsur hara mikro, ini ditandai

dengan membusuknya akar tanaman sehingga tanaman menjadi layu dan akhirnya mati.

II.2.2 Penanggulangan 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 (Suryadi dan Kusuma 2019).

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*. Pengelolaan air asam tambang dapat digolongkan menjadi dua yaitu pengelolaan: aktif dan pengelolaan pasif (Suryadi dan Kusuma 2019).

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 (Suryadi dan Kusuma., 2019).

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. 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). Pengelolaan pasif adalah cara pengelolaan air asam tambang jangka panjang dan dapat terus berlangsung selama dan setelah penambangan selesai (*mine closure*) (Suryadi dan Kusuma 2019).

Salah satu alternatif yang banyak dikaji sekarang adalah pengolahan AAT secara biologis dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat (BPS) atau *Sulphate Reducing Bacteria* (SRB) untuk mendekontaminasi sulfat. Selain itu, BPS juga mampu menurunkan konsentrasi logam melalui proses pengendapan logam. Dalam proses pengolahan AAT secara biologis, perlu dilakukan secara lebih efisien dan ekonomis yaitu dengan menambahkan bahan organik dari sedimen lahan basah atau lumpur *wetland*. Bahan organik ini secara alami terdapat banyak

BPS, sehingga tidak perlu lagi diinokulasikan mikroba dari luar, serta penambahan nutrisi. Kandungan bahan organik yang tinggi dalam sedimen *wetland* menyediakan lingkungan yang ideal untuk populasi bakteri pereduksi sulfat (Fahrudin, 2020).

II.2.3 Pencemaran Logam Berat Mangan

Pencemaran yang berbahaya antara lain adalah pencemaran logam berat. Logam berat merupakan salah satu jenis zat polutan lingkungan yang paling umum dijumpai dalam perairan. Logam berat ini juga dapat berdampak negatif terhadap manusia yang menggunakan air tersebut dan organisme yang ada di dalam sungai. Terdapatnya kandungan logam berat dalam organisme mengindikasikan adanya sumber logam berat yang berasal dari alam atau dari aktivitas manusia. Kandungan logam berat dalam perairan secara alamiah berada dalam jumlah yang relatif sedikit. Adanya peningkatan serta kontinuitas buangan air limbah industri yang mengandung senyawa logam berat beracun, cepat atau lambat akan merusak ekosistem pada perairan. Hal ini disebabkan karena logam berat sukar mengalami pelapukan, baik secara fisika, kimia, maupun biologis (Kamarati *et al.*, 2018).

Mangan (Mn) merupakan unsur logam golongan VII, dengan berat atom 54,93, titik lebur 1247°C, dan titik didihnya 2032°C. Di alam jarang sekali berada dalam keadaan unsur. Umumnya berada dalam keadaan senyawa dengan berbagai macam valensi. Di dalam hubungannya dengan kualitas air yang sering dijumpai adalah senyawa mangan dengan valensi 2, valensi 4 dan valensi 6. Di dalam sistem air alami dan juga di dalam sistem pengolahan air, senyawa mangan dan

juga besi berubah-ubah tergantung derajat keasaman (pH) air (Febriana dan Ayuna, 2015).

Mangan adalah logam berat bersifat esensial yang berfungsi membangun struktur tulang yang sehat, metabolisme tulang dan membantu menciptakan enzim. Mangan bersifat korosi jika melebihi batas sehingga mengakibatkan tubuh mudah terkena penyakit. Mangan (Mn) dalam air dalam jumlah kecil (0,5 mg/L) Mn bersifat neurotoksik apabila terminum. Gejala yang timbul berupa gejala susunan saraf, insomnia, kemudian lemah pada kaki dan otot muka sehingga ekspresi muka menjadi beku (Awliahasanah *et al.*, 2021).

II.3 Sedimen *Wetland*

II.3.1 Peranan Sedimen *Wetland*

Penanggulangan AAT dengan menggunakan senyawa kimia sangat tidak efisien, tidak ramah lingkungan dan biaya yang dikeluarkan sangat mahal. Agar pengolahan limbah berlangsung secara efektif dan ramah lingkungan dapat dilakukan dengan pengolahan secara biologi dengan memanfaatkan organisme. 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).

Teknik pengolahan pasif yang banyak digunakan dalam pengolahan AAT adalah lahan basah buatan (*constructed wetland*). Rawa buatan adalah suatu sistem yang dibangun dan dirancang menyerupai rawa alami untuk keperluan air

tercemar. Proses pengolahan air tercemar pada rawa buatan merupakan suatu proses ilmiah yang melibatkan tumbuhan air, sedimen, dan mikroorganisme, dengan matahari sebagai sumber energi (Sekarjannah, 2019). Sistem lahan basah anaerobik menggunakan komposisi reaktif material berupa kompos, seresah daun, dan serbuk gergaji, yang ditambahkan lumpur aktif yang akan menstimulasi pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat untuk meningkatkan alkalinitas dan menyisihkan logam dalam bentuk endapan sulfida.

Salah satu penanganan penyebaran logam terlarut dan air asam tambang dilakukan dengan pengelolaan *wetland*. Pada awalnya *wetland* dimanfaatkan sebagai suatu sistem alami untuk tempat penampungan air limpasan permukaan seperti rawa, air payau, tanah gambut. *Wetland* juga diterapkan di daerah kering untuk sarana air bersih. Perkembangan selanjutnya, *wetland* dipakai untuk proses ekosistem alami pada penetralan kualitas air seperti pH dan kandungan logam terlarut dalam air. Tingkat keasaman air asam tambang berkisar 2–4. Pemanfaatan lahan basah untuk pengolahan air limbah bertujuan mengurangi dampak yang merugikan bagi manusia dan ekosistem tersebut telah dilakukan dua dekade terakhir ini di area penambangan terutama menangani air asam tambang untuk tambang batubara dan logam terlarut (Sucahyo *et al.*, 2018).

Teknologi konstruksi *wetland* bisa memisahkan logam terlarut seperti mineral Fe, Co, Ni, Mn. Oleh karena itu sedimen *wetland* sebagai sarana atau fasilitas untuk menguraikan logam terlarut dalam air dan sarana untuk menetralkan air asam tambang sangat diperlukan. Penggunaan *wetland* sebagai teknologi remediasi cukup efektif untuk pengolahan air yang tercemar, yaitu air

asam tambang dan logam terlarut. Penerapan sistem konstruksi *wetland* dalam pengolahan air asam tambang dalam menanggulangi air asam tambang memiliki berbagai keuntungan yaitu biaya pembuatan *wetland* lebih murah dari pada pembuatan pengelolaan dan pengolahan air asam tambang sistem aktif, menggunakan proses alamiah, operasional dan perawatan *wetland* yang mudah dibandingkan sistem lainnya (Sucahyo *et al.*, 2018).

II.3.2 Sedimen Bakau

Mangrove merupakan hutan lahan basah yang memiliki nilai ekonomis dan ekologi yang tinggi. Indonesia memiliki hutan mangrove yang luas serta potensi yang sangat besar jika dikelola dengan baik. Salah satunya perlu batu kunci dalam ekosistem mangrove yaitu bakteri sebagai agen pendekomposisi. Keanekaragaman komunitas mikroorganisme di dalam sedimen sangat tinggi. Hal ini disebabkan sedimen mendukung dan membantu pembentukan kerjasama lingkungan mikro aerobik dan anaerobik. Aktivitas bakteri dalam siklus unsur hara pada sedimen adalah suatu hal yang tidak bisa dipisahkan dan saling berkaitan. Aktivitas bakteri tersebut tergantung pada ketersediaan karbon-karbon yang dioksidasi. Karbon bersama dengan unsur lainnya seperti fosfor (P) dan nitrogen (N) melalui proses fotosintesis menghasilkan jaringan tumbuh-tumbuhan yang menjadi makanan hewan (Yulma *et al.*, 2019).

Ekosistem mangrove merupakan habitat penting bagi berbagai hewan, tanaman dan mikroorganisme. Kondisi ekosistem mangrove yang merupakan keunikannya yaitu bersalinitas tinggi, tanah yang berlumpur, daerah pasang surut, kelembapan tinggi dan kondisi anaerobik. Produktivitas tinggi pada ekosistem mangrove dibanding dengan ekosistem lainnya memiliki kemampuan

dekomposisi bahan organik yang tinggi dan mejadikan mata rantai ekologis sangat penting bagi kehidupan makhluk hidup yang berada pada ekosistem mangrove (Baharudin *et al.*, 2022).

Mikroorganisme mangrove memegang peran penting dalam membantu daur ulang dan transformasi berbagai nutrisi yang mempengaruhi ekosistem mangrove lebih produktif. Mikroorganisme memiliki kemampuan untuk mengasilkan metabolit yang dapat mendegradasi polutan kompleks menjadi senyawa sederhana, mikroorganisme yang tahan terhadap racun logam berat yang ada di lingkungan karena sudah memiliki sifat resistensi. Genus *Bacillus* merupakan kelompok bakteri yang terdapat dalam sedimen bakau yang mampu melakukan remediasi logam berat (Baharudin *et al.*, 2022).

Banyak mikroorganisme yang bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman mangrove. Bakteri penambat nitrogen, bakteri pelarut fosfat, dan bakteri pereduksi sulfat telah diisolasi dan dikultur dari tanah mangrove. Tumbuhan mangrove menyediakan tempat kolonisasi mikroba dan nutrisi untuk pertumbuhan mikroba. Ordo utama yang terdeteksi adalah Desulfobacterales dengan kelimpahan tinggi sekitar 17,08%. Dalam penelitian Yusron *et al.*, (2009). menjelaskan bahwa *Desulfovibrio* sp, merupakan kelompok bakteri yang paling banyak ditemukan pada sedimen dengan kandungan sulfat yang tinggi dibandingkan dengan kelompok bakteri pereduksi sulfat lainnya. *Desulfovibrio* sp, merupakan bakteri pereduksi sulfat yang mampu hidup pada kondisi yang sedikit oksik, Karakteristik ini berkaitan dengan kemampuan bakteri menghasilkan enzim yang mampu melindungi sel dari stres oksigen, Berkaitan dengan kemampuannya hidup dalam kondisi sedikit oksik.

II.4 Bakteri Pereduksi Sulfat

Pendekatan untuk optimalisasi sistem *constructed wetland* dalam pengelolaan AAT adalah menggunakan komponen biologis. Agen biologis yang sangat berperan dalam penanganan AAT adalah bakteri pereduksi sulfat (BPS) (Widyati, 2007). Bakteri pereduksi sulfat berperan dalam mereduksi sulfat menjadi sulfida (H_2S) sehingga dapat menurunkan konsentrasi sulfat dan logam-logam terlarut dalam AAT. Genus BPS yang sering ditemukan pada bagian bawah sedimen, seperti genus *Desulfovibrio* (Suryatmana *et al.*, 2020).

Bakteri pereduksi sulfat mengoksidasi bahan organik dan H_2 dengan menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron dengan menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) dan ion bikarbonat (HCO_3^-). Hidrogen sulfida yang dihasilkan menyebabkan penurunan sulfat sehingga terjadi peningkatan pH serta ion bikarbonat yang dihasilkan berperan sebagai buffer yang dapat meningkatkan pH. Dalam pertumbuhan dan aktivitasnya, BPS memerlukan donor elektron yang dapat diperoleh dari substrat organik (Suryatmana *et al.*, 2020).

Pemanfaatan BPS di Indonesia telah dilaporkan dalam beberapa hasil penelitian. Selain digunakan dalam bioremediasi AAT, BPS juga digunakan dalam bioremediasi lahan pasca tambang dan peningkatan kemampuan tumbuh tanaman. Bakteri pereduksi sulfat dapat diperoleh dari substrat-substrat berlumpur seperti pada sedimen. Cara ini dilakukan dalam bioreaktor yang tidak diinokulasikan lagi mikroba dari luar karena secara alami sudah ada mikroba di dalamnya dan menetap pada sedimen *wetland* (May, 2007).

Mikroorganisme yang telah digunakan dalam pencucian mikrobial logam dari bijih/limbah mencakup genera yang berbeda dan termasuk bakteri seperti *Acidiphilium cryptum*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *At. caldus*, *At. thiooxidans*, *Acidianus brierleyi*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Cronobacter*, *Ferribacterium limneticum*, *Ferroplasma acidiphilum*, *Gallionella ferruginea*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *L. ferriphilum*, *Ochrobactrum anthropi*, *Sulfolobus* sp., *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *S. acidophilus*, *Thiobacillus denitrificans*, dan *T. thioparus*. Remediasi air asam tambang dengan BPS biasanya didasarkan pada campuran garam dan substrat organik yang tersedia secara lokal seperti pupuk kandang, serbuk gergaji, kompos jamur bekas, limbah tebu, serpihan kayu, ekstrak ragi dan sumber karbon lainnya untuk metabolisme bakteri. Optimalisasi campuran ini penting untuk mencapai penghilangan logam dan sulfat yang maksimal. Mekanisme remediasi melibatkan konversi sulfat menjadi hidrogen sulfida dan konversi bahan organik menjadi hidrogen karbonat. Ion logam berat yang ada kemudian bereaksi dengan gas hidrogen sulfida yang dihasilkan untuk membentuk endapan logam sulfida yang tidak larut dan logam tersebut dihilangkan melalui pengendapan sulfida (Ayangbenro *et al.*, 2018).

Sebagian besar BPS tumbuh optimal antara pH 6 dan 8. Di luar rentang pH ini, terjadi penurunan laju reduksi sulfat mikroba dan penurunan kapasitas penghilangan logam. pH asam meningkatkan kelarutan logam sulfida. Bakteri pereduksi sulfat sebagian besar mesofilik, tetapi juga mencakup beberapa spesies termofilik dan psikrofilik. Organisme ini juga dapat mentolerir suhu di bawah 5°C hingga 75°C. Logam berat yang ditargetkan biasanya As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn,

Mo, Ni, Pb, Se dan Zn. Bioreaktor ini terbukti efektif dalam penghilangan dan/atau pemulihan logam dan dalam pengendalian pencemaran lingkungan. Mereka hemat biaya dan memungkinkan pengurangan, dan penghapusan dalam beberapa kasus, lumpur yang memerlukan pembuangan mahal melalui produksi air berkualitas tinggi untuk dibuang ke lingkungan. Teknologi ini juga mengurangi penghambatan SRB oleh logam terlarut dan memungkinkan pengoperasian bioreaktor yang optimal (Ayangbenro *et al*, 2018)

Bakteri pereduksi sulfat dapat diperoleh dari substrat-substrat berlumpur seperti pada sedimen. Cara ini dilakukan dalam bioreaktor yang tidak diinokulasikan lagi mikroba dari luar karena secara alami sudah ada mikroba di dalamnya dan menetap pada sedimen *wetland*. Sedimen rawa maupun sedimen sawah pada air asam tambang mampu meningkatkan pH air asam tambang, menurunkan kadar sulfat dan meningkatkan pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat (BPS) sehingga dapat digunakan untuk penanggulangan pencemaran lingkungan akibat air asam tambang (Fahrudin *et al.*, 2018).

II.4.1 Peranan Bakteri Pereduksi Sulfat

Bakteri merupakan salah satu mikroorganisme yang berperan sebagai pengurai di dalam sedimen. mendapatkan total bakteri lebih tinggi pada sedimen permukaan dibandingkan dengan sedimen pada kedalaman 30 cm (Yulma *et al.*, 2019). Dalam penelitian Fahrudin dan Abdullah, (2018) menjelaskan bahwa salah satu alternatif proses penanganan pencemaran secara biologis dengan memanfaatkan aktivitas mikroba yaitu dengan menggunakan Bakteri Pereduksi Sulfat. Bakteri ini mampu mendekontaminasi sulfat dan mampu menurunkan

konsentrasi logam. Bakteri Pereduksi Sulfat pada umumnya bersifat anaerob dan dapat bereaksi dengan berbagai logam menghasilkan hidrogen sulfida (H₂S).

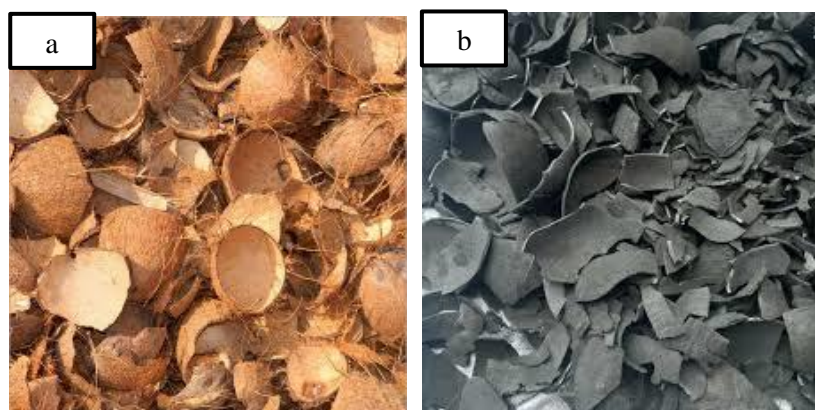
Bakteri pereduksi sulfat merupakan bakteri yang bersifat anaerob heterotrof, sehingga sering ditemukan di bagian bawah sedimen dan membutuhkan substrat organik untuk pertumbuhan dan aktivitasnya. Penambahan substrat organik meningkatkan pertumbuhan BPS secara signifikan dan menurunkan populasi bakteri yang bersifat *autotrophic bioleaching* seperti bakteri pengoksidasi besi dan sulfur yang menyebabkan pH menjadi rendah serta meningkatkan pH AAT. BPS memerlukan donor elektron dari asam-asam organik berbobot molekul rendah seperti laktat, asetat, propionat, butirat, etanol yang dapat diperoleh dari mineralisasi substrat organik. Lumpur merupakan tempat yang baik bagi pertumbuhan BPS karena bersifat anoksik. Habitat pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat cukup luas, selain di lautan, bakteri ini juga ditemukan di lahan sawah dan perairan darat. BPS lebih banyak ditemukan pada lingkungan anoksik, terutama di bagian bawah sedimen (Perala *et al.*, 2022).

BPS bersifat anaerob obligat, namun dapat bertahan dalam waktu yang cukup lama pada kondisi aerasi yang baik bila tersedia nutrisi yang berlimpah. Kondisi tanah yang memiliki aerasi baik menyebabkan pori-pori tanah terisi gas O₂ berpengaruh terhadap rendahnya populasi BPS yang merupakan mikroba anaerob obligat. Oksigen menonaktifkan berbagai enzim dari bakteri pereduksi sulfat dan keterpaparan oksigen selama berjam-jam atau sehari-hari menurunkan viabilitasnya. BPS menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron dan substrat organik sebagai donor elektron untuk pertumbuhannya.

II.5 Biochar Tempurung Kelapa

II.5.1 Arang Tempurung Kelapa

Biochar adalah bahan padat kaya karbon hasil konversi dari limbah organik pertanian melalui pembakaran tidak sempurna atau suplai oksigen terbatas (pyrolysis). Pembakaran tidak sempurna dapat dilakukan dengan alat pembakaran atau pirolisator dengan suhu 250-350°C selama 1-3,5 jam, bergantung pada jenis biomassa dan alat pembakaran yang digunakan. Pembakaran juga dapat dilakukan tanpa pirolisator, tergantung kepada jenis bahan baku. Sumber bahan baku biochar terbaik adalah limbah organik khususnya limbah pertanian. Potensi bahan baku biochar tergolong melimpah yaitu berupa limbah sisa pertanian yang sulit terdekomposisi atau dengan rasio C/N tinggi. Di Indonesia, potensi penggunaan biochar sangat besar mengingat bahan bakunya seperti tempurung kelapa, sekam padi, kulit buah kakao, tempurung kelapa sawit, tongkol jagung, dan bahan lain. (Nurida, 2014).



Gambar 1. (a) Tempurung kelapa dan (b) Arang tempurung kelapa (sumber: <https://kagama.co>)

Tempurung kelapa (gambar a) merupakan limbah padat dari hasil olahan kelapa yang telah di ambil daging kelapa untuk mendapatkan santan (*coconut*

milk). Tempurung kelapa pada umumnya digunakan untuk bahan bakar, keperluan rumah tangga atau souvenir. Melimpahnya tempurung kelapa dapat diangkat sebagai potensi desa dalam meningkatkan perekonomian masyarakat. Arang tempurung (gambar b) kelapa dapat dijadikan sebagai karbon aktif. Karbon aktif adalah material berpori yang mempunyai kemampuan untuk menyerap pengotor yang terdapat dalam air yaitu sebagai filter air (Nustini dan Allwar, 2019).

II.5.2 Aktivasi Arang Tempurung Kelapa

Karbon aktif sering juga disebut sebagai arang aktif, adalah suatu jenis karbon yang memiliki luas permukaan yang sangat besar karena melalui proses aktivasi. Sedangkan karbon sendiri memiliki bentuk amorf dan banyak ditemukan dari berbagai bahan utama, antara lain batubara, tempurung kelapa, limbah industri, kayu, biji aprikot, kulit singkong, dan kulit kemiri. Karbon aktif dapat dikatakan “*material of the future*” karena dapat dikatakan sebagai material dengan banyak fungsi karena manfaat yang sempurna untuk dalam berbagai proses penjernihan/ pemulihan/ penyehatan material termasuk air (Suryono *et al.*, 2018). Biochar tempurung kelapa dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Biochar (sumber: www.agroindustri.id)

Arang aktif merupakan arang yang dimurnikan yaitu konfigurasi atom karbonnya dibebaskan dari ikatan dengan unsur lain serta pori-porinya dibersihkan. Selain digunakan sebagai bahan bakar, arang digunakan sebagai adsorben (penyerap). Daya serap ditentukan oleh luas permukaan partikel dan kemampuan ini dapat ditingkatkan jika arang tersebut dilakukan aktivasi dengan aktivator bahan-bahan kimia antara lain NaCl, ZnCl₂, H₃PO₄, Na₂CO₃ dan garam mineral lainnya ataupun secara fisika dengan pemanasan pada temperatur tinggi dengan suhu sampai dengan 850°C. Arang aktif cangkang kelapa dapat menaikkan nilai pH serta menurunkan nilai besi (Fe) dan mangan (Mn) pada Air Asam Tambang (Najmia *et al.*, 2021).

Menurut Ardiwinata (2020) proses aktivasi merupakan proses untuk menghilangkan hidrokarbon yang melapisi permukaan arang sehingga dapat meningkatkan porositas karbon. Aktivasi arang aktif dapat dilakukan melalui proses aktivasi secara fisik dan proses kimia. Proses aktivasi secara fisik dapat dilakukan dengan pemberian uap air atau gas CO₂, sedangkan secara kimia dilakukan dengan penambahan zat kimia tertentu. Aktivator yang digunakan dalam penelitian ini adalah NaOH. Fungsi aktivasi adalah untuk membuka pori-pori adsorben yang tertutup hidrokarbon, melepas matriks adsorben, dan zat-zat organik lainnya sehingga memperbesar kapasitas adsorpsi. NaOH dipilih karena bersifat sebagai reduktor yakni mampu mereduksi bahan lain dan memiliki keunggulan diantaranya yaitu bersifat stabil pada temperatur kamar, mudah larut dalam air, tidak terlalu berbahaya dan murah (Mastiani *et al.*, 2018).