

**PENGARUH PERLAKUAN *BIOCHAR* DARI SEKAM PADI DAN
SEDIMEN BAKAU TERHADAP PENURUNAN LOGAM BERAT BESI
(Fe) DAN SULFAT PADA LIMBAH AIR ASAM TAMBANG**

SKRIPSI

**AURELIA SALSABILA
H041 19 1001**

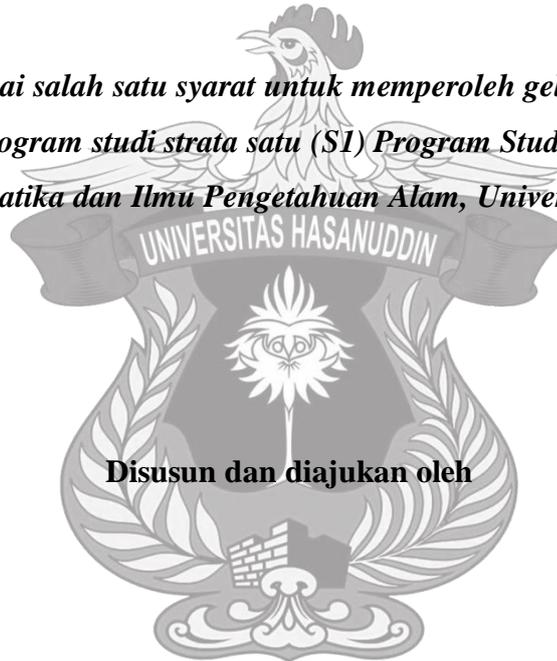


**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**PENGARUH PERLAKUAN BIOCHAR DARI SEKAM PADI DAN
SEDIMEN BAKAU TERHADAP PENURUNAN LOGAM BERAT BESI
(Fe) DAN SULFAT PADA AIR ASAM TAMBANG**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
pada program studi strata satu (S1) Program Studi Biologi,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin*



Disusun dan diajukan oleh

AURELIA SALSABILA

H041 19 1001

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

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH PERLAKUAN BIOCHAR DARI SEKAM PADI DAN
SEDIMEN BAKAU TERHADAP PENURUNAN LOGAM BERAT BESI
(Fe) DAN SULFAT PADA LIMBAH AIR ASAM TAMBANG

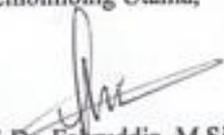
Disusun dan diajukan oleh

AURELIA SALSABILA
H041 19 1001

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal 31 Juli 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

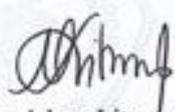
Pembimbing Utama,


Prof. Dr. Fahrudin, M.Si.
NIP 196509151991031002

Pembimbing Pertama,


Dr. Eva Johannes, M.Si.
NIP 196102171986012001

Ketua Program Studi,


Dr. Magdalena Litaay, M.Sc.
NIP 196409291989032002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aurelia Salsabila

NIM : H041191001

Program Studi : Biologi

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa Skripsi dengan judul Pengaruh Perlakuan Biochar dari Sekam Padi dan Sedimen Bakau terhadap Penurunan Logam Berat Besi (Fe) dan Sulfat pada Limbah Air Asam Tambang adalah karya saya sendiri dan tidak melanggar hak cipta pihak lain. Apabila di kemudian hari skripsi karya saya ini terbukti bahwa sebagian atau keseluruhannya adalah hasil karya orang lain yang saya pergunakan dengan cara melanggar hak cipta pihak lain, maka saya bersedia menerima sanksi.

Makassar, 31 Juli 2023

Yang Menyatakan



Aurelia Salsabila
NIM. H041191001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. atas segala berkah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul Pengaruh Perlakuan Biochar dari Sekam Padi dan Sedimen Bakau terhadap Penurunan Logam Berat Besi (Fe) dan Sulfat pada Limbah Air Asam Tambang sebagai salah satu perwujudan Tri Darma Perguruan Tinggi serta syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Sains di Departemen 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 bersifat membangun dari berbagai pihak untuk dapat menyempurnakan penelitian ini. Penulis berharap hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai sumber informasi tentang pentingnya penanggulangan air asam tambang dengan memanfaatkan sedimen bakau dan biochar sebagai salah satu alternatif efektif untuk pengolahan air asam tambang.

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada orang tua tercinta Ayahanda Kurniadi Ahmad S.Pd dan Ibunda Nursuadah Abdullah. Berkat doa, dukungan dan nasihatnya penulis dapat semangat dalam menjalani dinamika perkuliahan selama ini. Tidak lupa pula ucapan terima kasih kepada kedua saudara penulis Alierf Abdan Syakur, S.T dan Muhammad Agiel Syafiq. Ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya penulis sampaikan juga kepada Bapak dosen pembimbing yaitu Bapak Prof. Dr. Fahrudin, M.Si. dan Ibu Dr. Eva Johannes, M.Si. yang senantiasa membimbing penulis dalam menyelesaikan penelitian hingga penyusunan tugas akhir. Serta kepada tim dosen penguji yaitu

Bapak Dr. Eddyman W. Ferial S.Si, M. Si dan Ibu Helmy Widyastuti S.Si, M.Si yang senantiasa memberikan kritik dan saran membangun sehingga penulis dapat banyak belajar selama pengerjaan penelitian ini. Selain itu, ucapan terima kasih penulis juga di sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Jamaluddin Jompa, M. Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta seluruh jajarannya.
2. Bapak Dr. Eng Amiruddin, M.Sc. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin beserta seluruh jajarannya.
3. Ibu Dr. Magdalena Litaay, M.Sc selaku Ketua Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
4. Ibu Dr. Eva Johannes, M.Si. selaku dosen Penasehat Akademik (PA) sekaligus dosen penguji yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Ibu/Bapak Dosen Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddinyang telah memberikan ilmu, pesan moral dan pembelajaran etika yang luar biasa kepada mahasiswanya.
6. Kak Fuad Gani, S.Si, Heriadi, S.Si M.Si, Nenis Sardiani, S.Si, dan Syafrian Nur Muhammad, S.Si yang telah banyak membimbing dan membantu penulis selama perkuliahan.
7. Sahabat-sahabat penulis sejak SD hingga di masa yang akan datang, Amita Nurul Janna, Anugrah Ayu Adyana, Annisaa Elfiraa, Agnes Dea Ugie Wihdatul Izzah, Aqifah Nurul Sarsyah, Adhwa Rizky Rania, Aura Mulya Ramadhani dan Aulya Farahdiba. Terimakasih sudah menjadi tempat pulang dari lelahnya dunia kampus.

8. Sahabat sahabat penulis “Abals”, Rara Anidar Amaliah, Indah Dwi Agusty, Nurul Aulia M, Annisa, Ririn Annur. Terimakasih sudah kebersamaian hingga saat ini.
9. Sahabat-sahabat penulis sejak mahasiswa baru, Muhammad Farid, Firazh Ahmadilla Ma’ga, Raffi Gani, Putri Yasmin dan Widya Safitri. Serta Noer Zakiah Derajat Sam, dan Lusiana. Terimakasih karena selalu ada untuk penulis.
10. Teman teman rekan penelitian, Satriani, Nurul Faradhilah, Lulu Dwiyanti. Terimakasih sudah berjuang sama-sama.
11. Teman-teman di Biologi 2019, Biotigris “Bersama Bersatu Berproses” dan MIPA 2019 “Selamanya Tetap Ada”. Terima kasih atas segala pengalaman dan kenangan indah yang telah diukir bersama dengan semangat kebersamaan dan kekeluargaan.
12. Teman-teman, kakak-kakak dan adik-adik di HIMBIO FMIPA “Janji Kami Mahasiswa Biologi Tak Akan Pernah Kami Lupakan” dan di KM FMIPA”. Terima kasih atas segala ilmu, nasehat, pengalaman, dan hangatnya rasa kekeluargaan yang telah diberikan dan dibangun selama penulis menjalani roda organisasi dan berada dalam jenjang pengaderan.
13. Kepada Rayhan Adi Anggara, terimakasih untuk segala sabar yang telah diberikan dalam membantu proses penyelesaian skripsi penulis.
14. Serta kepada seluruh pihak yang terlibat dalam kelancaran penelitian penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Semoga segala bantuan yang telah diberikan, dapat bernilai pahala.

ABSTRAK

Air asam tambang (AAT) merupakan limbah pencemar lingkungan yang terjadi akibat aktivitas pertambangan. AAT dapat ditanggulangi dengan menggunakan biochar dari sekam padi dan sedimen bakau. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan biochar dari sekam padi dan sedimen bakau pada penurunan logam berat Fe, kadar sulfat, peningkatan pH dan jumlah populasi mikroba. Penurunan kadar logam berat Fe diukur menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom, penurunan kadar sulfat diukur menggunakan Spektrofotometer uv Vis, peningkatan pH diukur menggunakan pH meter, dan total mikroorganisme dihitung dengan metode SPC (*Standar plate count*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan biochar sekam padi dan sedimen bakau pada AAT yang lebih baik dalam mereduksi logam berat Fe adalah P1 (AAT 1250 mL + sedimen bakau 20% + biochar 15%) yaitu 0,39 ppm dibandingkan P3 (AAT 1250 mL + biochar 15%) hanya mampu mereduksi logam berat Fe sebesar 0,71 ppm. Perlakuan biochar sekam padi dan sedimen bakau pada AAT yang lebih baik dalam mereduksi sulfat adalah P1 (AAT 1250 mL + sedimen bakau 20% + biochar 15%) yaitu 65,8 ppm, dibandingkan P3 (AAT 1250 mL + biochar 15%) yang hanya mampu mereduksi sulfat sebesar 127 ppm. Adapun dalam peningkatan pH, perlakuan biochar sekam padi dan sedimen bakau pada AAT menunjukkan hasil yang paling baik pada P1 (AAT 1250 mL + sedimen bakau 20% + biochar 15%) yaitu 6,6, dibandingkan P3 (AAT 1250 mL + biochar 15%) yang hanya mampu meningkatkan pH AAT sebesar 4,05. Perlakuan biochar sekam padi dan sedimen bakau juga mampu meningkatkan jumlah populasi mikroba paling baik pada perlakuan P1(AAT 1250 mL + sedimen bakau 20% + biochar 15%) yaitu $2,5 \times 10^{16}$ CFU/mL, dibanding P4 (AAT 1250mL) yang hanya mampu meningkatkan jumlah populasi mikroba sebesar $1,0 \times 10^4$ CFU/mL.

Kata Kunci: Air Asam Tambang, Biochar Sekam Padi, Sedimen bakau, Bakteri pereduksi Sulfat.

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is an environmental pollutant waste that occurs as a result of mining activities. AMD can be overcome by using biochar from rice husks and mangrove sediments. This study aims to determine the effect of biochar treatment from rice husks and mangrove sediments on reducing heavy metal Fe, sulfate levels, increasing pH and microbial population numbers. Decreasing levels of heavy metal Fe was measured by using an Atomic Absorption Spectrophotometer, decreasing levels of sulfate was measured using a UV Vis Spectrophotometer, increasing pH was measured by using a pH meter, and total microorganisms were calculated using the SPC (Standard plate count) method. The results showed that the best AMD treatment of rice husk and mangrove sediment biochar in reducing heavy metal Fe was P1 (1250 mL AMD + 20% mangrove sediment + 15% biochar), namely 0.39 ppm compared to P3 (1250 mL AMD + biochar 15%) was only able to reduce the heavy metal Fe by 0.71 ppm. The treatment of rice husk biochar and mangrove sediments in AAT which was the best in reducing sulfate was P1 (1250 mL AAT + 20% mangrove sediment + 15% biochar) which was 65.8 ppm, compared to P3 (1250 mL AMD + 15% biochar) which only able to reduce sulfate by 127 ppm. As for increasing pH, treatment of rice husk biochar and mangrove sediments on AMD showed the best results on P1 (1250 mL AAT + 20% mangrove sediment + 15% biochar) is 6.6, compared to P3 (1250 mL AMD + 15% biochar) which was only able to increase the pH of AMD by 4.05. Treatment of rice husk biochar and mangrove sediments was also able to increase the number of microbial populations best in treatment P1 (1250 mL AMD + 20% mangrove sediment + 15% biochar) is 2.5×10^{16} CFU/mL, compared to P4 (1250mL AMD) which only able to increase the number of microbial population by 1.0×10^4 CFU/mL.

Key word: Acid Mine Drainage, Biochar of Rice Husk, Mangrove Sediment, Sulphate Reduction Bacteria

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGAJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	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	6
I.3 Manfaat Penelitian	6
I.4 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
II.1 Aktivitas Pertambangan	7
II.2 Pencemaran Limbah Pertambangan.....	8
II.2.1 Pencemaran Logam Berat	10
II.2.2 Air Asam Tambang	13

II.2.3 Penanggulangan Air Asam Tambang	17
II.3 Biochar	18
II.3.1 Biochar dari Sekam Padi.....	20
II.3.2 Pembuatan Biochar dari Sekam Padi	22
II.3.3 Mekanisme Biochar dalam Menyerap Logam Berat.....	23
II.4 Sedimen <i>Wetland</i>	24
II.4.1 Sedimen Bakau.....	26
II.5 Bakteri Pereduksi Sulfat.....	27
II.5.1 Peranan Bakteri Pereduksi Sulfat	28
BAB III METODE PENELITIAN	30
III.1 Alat	30
III.2 Bahan	30
III.3 Prosedur Penelitian	30
III.3.1 Sterilisasi Alat.....	30
III.3.2 Pengambilan Sampel.....	31
III.3.3 Pembuatan Air Asam Tambang	31
III.3.4 Aktivasi Arang Sekam Padi.....	31
III.3.5 Pembuatan Perlakuan	32
III.4 Analisis Data	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
VI. 1 Perubahan Fisik Air Asam Tambang	36
VI. 2 Pengukuran Kandungan Logam Berat Besi (Fe).....	38
VI. 3 Pengukuran Kadar Sulfat	40

VI. 4 Perhitungan pH	42
VI. 5 Perhitungan Total Mikroba.....	44
BAB V PENUTUP	46
V. 1 Kesimpulan	46
V. 2 Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA.....	48
LAMPIRAN	53

DAFTAR TABEL

Tabel Hasil Pengukuran Logam Berat Besi	53
Tabel Hasil Pengukuran Sulfat	53
Tabel Hasil Pengukuran pH	53
Tabel Hasil Perhitungan Total Mikroba.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sekam Padi Hasil Karbonisasi dan Biochar Sekam padi	21
Gambar 2. Kondisi Fisik Air Asam Tambang Hari Ke-0	36
Gambar 3. Kondisi Fisik Air Asa, Tambang Hari Ke-30	37
Gambar 4. Pengukuran Kandungan Logam Berat Fe	38
Gambar 5. Pengukuran Kadar Sulfat	40
Gambar 6. Pengukuran pH	42
Gambar 7. Perhitungan Total Mikroba	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Hasil Pengukuran	53
Lampiran 2. Foto Pengambilan Sampel	54
Lampiran 3. Foto Pembuatan Biochar Sekam Padi	54
Lampiran 4. Foto Pembuatan Perlakuan AAT	55
Lampiran 5. Foto Pembuatan Media dan Persiapan Pengerjaan	55
Lampiran 6. Pengukuran Logam Berat Fe, Kadar Sulfat, dan pH.....	56
Lampiran 7. Perhitungan Total Mikroba.....	56

BAB 1

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kegiatan pertambangan merupakan kegiatan jangka panjang, dan melibatkan teknologi tinggi serta padat modal. Selain itu, karakteristik mendasar industri pertambangan adalah membuka lahan dan mengubah bentang alam sehingga berpotensi memberikan dampak terhadap lingkungan. Keberadaan industri pertambangan berdampak terhadap perubahan bentang alam, penurunan kesuburan tanah, terjadinya ancaman terhadap keanekaragaman hayati, penurunan kualitas air dan udara serta pencemaran lingkungan. Industri pertambangan pada pasca operasi juga meninggalkan buangan sisa pertambangan yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan yang memiliki keterkaitan dengan kualitas dan kuantitas air (Fitriyanti, 2018).

Salah satu limbah pertambangan yaitu air asam tambang. Air asam tambang disingkat AAT adalah air yang bersifat asam, mengandung logam berat dan sulfat karena terbentuk akibat aktivitas penambangan sebagai hasil reaksi dari mineral sulfida, khususnya pirit dengan oksigen serta air. Ketika ion besi teroksidasi dan menghasilkan oksida besi terhidrasi, keasaman pada lingkungan sekitarnya meningkat. Air ini mempunyai tingkat keasaman (pH) bernilai 6 atau bahkan lebih rendah. Pada pH yang rendah terjadi peningkatan kelarutan logam berat di dalam air (Alghifary dan Yeremia., 2021).

Logam berat biasanya ditemukan sangat sedikit dalam air secara alami yang kurang dari 1 µg. Tingkat konsentrasi logam dalam air dibagi sesuai dengan tingkat

polusi, seperti polusi berat, polusi sedang, dan non-polusi. Air yang mengalami polusi berat biasanya memiliki kandungan logam berat yang tinggi di dalam air dan organisme yang hidup di dalamnya. Pada tingkat polusi sedang, kandungan logam berat dalam air dan organisme dalam air berada dalam batas marginal. Adapun pada tingkat non-polusi, kandungan logam berat dalam air dan organisme sangat rendah dan bahkan tidak terdeteksi keberadaannya. (Lestari dan Trihadiningrum, 2019).

Pencemaran logam terlarut dan timbulnya air asam tambang disebabkan oleh adanya resapan atau rembesan air permukaan ke batuan yang mengandung sulfida, serta oksidasi dari batuan yang terkupas pada lereng dinding tambang. (Suchahyo dkk., 2018). Logam berat di perairan memberikan dampak terhadap organisme perairan dan juga manusia yang tinggal di sekitar. Dampak yang ditimbulkan terhadap organisme perairan adalah terjadinya kematian ikan secara masal. Menurut effendi 2012 dalam Pratiwi 2020, Logam berat yang masuk ke tubuh manusia juga berbahaya untuk kesehatan karena dapat menghalangi kerja enzim sehingga metabolisme tubuh terganggu, menyebabkan kanker dan mutasi.

Salah satu logam berat pada air asam tambang yang berbahaya bagi manusia adalah besi (Fe). Kandungan besi dalam air dapat berasal dari larutan batuan-batuan yang mengandung senyawa Fe seperti Pirit. Air yang mengandung zat besi cenderung menimbulkan rasa mual apabila dikonsumsi, selain itu dalam dosis yang besar dapat merusak dinding usus halus. Kematian sering terjadi akibat rusaknya dinding usus halus. Menurut Wiyata (2003) dalam Asmaningrum (2016) kandungan zat besi yang melebihi 1 mg/L akan menyebabkan terjadinya iritasi pada mata dan kulit dan apabila kelarutan besi dalam air melebihi 10 mg/L akan menyebabkan air berbau.

Besarnya konsentrasi air asam tambang melebihi baku mutu lingkungan menyebabkan dampak yang sangat serius bagi manusia dan lingkungan sekitar. Maka kandungan air asam tambang harus dikurangi hingga mencapai nilai baku mutu lingkungan agar tidak mencemari lingkungan (Yulanis 2018). Pada umumnya, air asam tambang yang dihasilkan dari aktivitas penambangan di Indonesia ditangani dengan beberapa metode, diantaranya metode pengolahan aktif dan pengolahan pasif. Penanganan air asam tambang dengan pengolahan aktif dilakukan dengan menambahkan zat-zat kimia atau reagen penetral ke dalam sumber air asam tambang secara terus menerus dalam jangka waktu tertentu. Sedangkan pengolahan metode pasif dilakukan dengan memanfaatkan proses biogeokimiawi dengan memperhatikan laju aliran, topografi lokal, dan karakteristik lokasi. (Barrera dkk., 2017 dalam Alghifary dan Yeremia, 2021).

Salah satu metode pengolahan pasif untuk meremediasi air asam tambang dapat dilakukan secara biologis yaitu dengan memanfaatkan *Sulphate Reduction Bacteria* atau biasa dikenal dengan Bakteri Pereduksi Sulfat. Bakteri ini dalam kondisi anaerob dapat mereduksi sulfat dan dapat bereaksi dengan berbagai logam menjadi sulfida. Selain itu, terbentuknya sulfida juga memberikan dampak yang menguntungkan terhadap lingkungan yang mengandung logam terlarut tinggi karena senyawa ini sangat efektif dalam bereaksi dengan logam membentuk logam sulfida yang sangat stabil. Bakteri pereduksi sulfat sebagai agen biologis dapat membantu proses bioremediasi lingkungan. Bakteri pereduksi sulfat mampu tumbuh efektif pada lingkungan asam dan kandungan logam berat yang tinggi dengan membentuk biofilm. Biofilm merupakan bentuk koloni yang terdiri dari berbagai kelompok bakteri yang melekat pada permukaan suatu substrat (Purnamaningsih dkk, 2017).

Habitat pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat cukup luas. Bakteri ini dapat ditemukan di lautan, hingga di perairan darat. Hal ini dikarenakan bakteri pereduksi sulfat merupakan bakteri anaerob obligat, bakteri pereduksi sulfat lebih banyak ditemukan pada lingkungan anoksik, terutama di bagian bawah sedimen, salah satunya yaitu sedimen bakau. Karakteristik dari sedimen bakau adalah tidak adanya oksigen pada beberapa milimeter di bawah permukaan. Kurangnya oksigen, ditambah dengan kelimpahan bahan organik, menjadikan sedimen bakau sebagai lingkungan yang optimal untuk beberapa kelompok organisme anaerob, seperti bakteri pereduksi sulfat (Taketani dkk, 2010).

Salah satu komponen yang digunakan dalam pengendalian air asam tambang adalah dengan menggunakan biochar. Biochar adalah adsorben yang baik untuk mereduksi logam berat dalam air limbah. Biochar adalah bahan padat kaya karbon yang diperoleh melalui pembakaran tidak sempurna atau suplai oksigen terbatas pada suhu 250-500°C (Nurida, 2014). Biochar dengan luas permukaannya dapat mencapai ratusan hingga ribuan meter persegi serta memiliki mikroporositas yang dominan sehingga cocok dijadikan sebagai bahan adsorben yang dapat digunakan secara efisien dalam pengolahan air tercemar. Selain itu juga dapat menyediakan habitat yang cocok bagi mikroorganisme. Menurut Chen dkk (2017) dalam Lusiana dkk (2021), ukuran partikel yang baik bagi habitat mikroba yaitu 80 mesh atau 0,177 mm, karena partikel biochar halus sehingga memiliki ketersediaan nutrisi yang lebih besar daripada partikel kasar.

Sumber bahan baku biochar terbaik adalah limbah organik khususnya limbah pertanian terutama yang sulit terdekomposisi atau dengan rasio C/N tinggi seperti limbah sekam padi. Sekam padi merupakan produk samping dari

penggilingan padi. Sekam padi merupakan sumber daya lokal yang belum digunakan secara optimal, tersedia dalam jumlah melimpah, murah, dan mudah diperoleh. Sekam padi mengandung lignin dan selulosa yang tinggi. Lignin yang ada pada biochar dapat mempertahankan senyawa karbon dari senyawa organik agar tidak mudah lapuk. Selain itu, kandungan lignin pada biochar akan hilang pada proses pembakaran namun akan menghasilkan biochar, yang mengandung mineral seperti kalsium atau magnesium dan karbon anorganik (Lusiana, 2021).

Optimalisasi kinerja bakteri pereduksi sulfat dalam meremediasi limbah air asam tambang dapat ditingkatkan dengan pemanfaatan biochar yang diperlakukan dengan sedimen bakau. Biochar merupakan bahan basa yang dapat meningkatkan pH air asam tambang dan berkontribusi terhadap stabilisasi logam berat. Afinitas dari biochar juga berada pada permukaannya yang luas dan mengandung banyak pori yang dapat menyerap logam-logam berat sehingga dapat mengatasi pencemaran limbah air asam tambang Hidayat (2019). Salah satu biochar yang memiliki kemampuan dalam mereduksi logam berat adalah biochar dari sekam padi. Adanya bakteri pereduksi sulfat yang diperoleh dari sedimen bakau serta penambahan biochar dari sekam padi diharapkan dapat bekerja secara optimal dalam menurunkan kadar logam berat pada limbah air asam tambang serta meningkatkan pH. Sehingga perlu dilakukan penelitian ini sebagai salah satu upaya dalam penanggulangan limbah air asam tambang.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui penurunan kandungan logam berat Fe pada AAT dengan perlakuan biochar dari sekam padi dan sedimen bakau,
2. Mengetahui penurunan kandungan sulfat pada AAT dengan perlakuan biochar dari sekam padi dan sedimen bakau,
3. Mengetahui perubahan pH pada AAT dengan perlakuan biochar dari sekam padi dan sedimen bakau,
4. Menghitung total bakteri pada AAT dengan perlakuan biochar dari sekam padi dan sedimen bakau.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pentingnya penanggulangan limbah air asam tambang dengan memanfaatkan bakteri pereduksi sulfat yang diperoleh dari sedimen bakau serta penambahan biochar dari sekam padi sebagai salah satu alternatif yang efektif untuk pengolahan air asam tambang.

I.4 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari-Februari 2022 di Laboratorium Mikrobiologi, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar dan Laboratorium Kimia Kesehatan Balai Besar Laboratorium Kesehatan (BBLK) Makassar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Aktivitas Pertambangan

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2012, pertambangan adalah rangkaian kegiatan dalam rangka upaya pencarian, penambangan (penggalian), pengolahan, pemanfaatan dan penjualan bahan galian (mineral, batubara, panas bumi, migas). Menurut Risal dkk (2013), terdapat sejumlah unsur yang sudah pasti melekat pada pertambangan, yakni adanya tindakan penghancuran/perusakan, kebohongan, mitos, dan keuntungan untuk segelintir orang.

Pertambangan merupakan salah satu sektor yang dapat menghasilkan devisa besar bagi negara. Tercatat bahwa pada tahun 2007, penerimaan Negara perpajakan umum dari sektor pertambangan mencapai Rp 24.000 miliar. Tetapi selain devisa, industri pertambangan (terutama dengan metode pertambangan terbuka) telah menghasilkan dampak berupa kerusakan lingkungan yang sangat parah terutama pada hutan hujan tropika yang merupakan dominasi lapisan penutup dari permukaan bentang lahan yang ditambang (Budiana dkk, 2017).

Objek dari usaha pertambangan adalah sumber daya alam yang tak terbarukan, yang dalam pengelolaan dan pemanfaatannya dibutuhkan pendekatan manajemen ruangan yang ditangani secara holistik dan integratif dalam hal ini secara menyeluruh dan satu kesatuan dengan memperhatikan empat aspek pokok yaitu, aspek pertumbuhan, aspek pemerataan, aspek lingkungan, dan aspek konservasi (Astuti dkk, 2017).

II.2. Pencemaran Limbah Pertambangan

Pertambangan dikenal sebagai industri pionir yang memerlukan investasi besar karena membutuhkan pembangunan infrastruktur yang membuka suatu wilayah dari isolasi geografis. Kegiatan Pertambangan mempunyai beberapa karakteristik diantaranya yaitu tidak dapat diperbaharui (*non renewable*), mempunyai resiko relatif lebih tinggi, dan dalam pengusahaannya mempunyai dampak lingkungan baik fisik maupun lingkungan yang relatif lebih tinggi dibandingkan perusahaan komoditi lain pada umumnya (Manik, 2018).

Menurut Pertiwi (2011) dalam Apriyanto dan Harini (2012) menguraikan dampak pada kondisi fisik meliputi pencemaran air yang diakibatkan kontaminasi dengan limbah hasil sisa dari kegiatan pertambangan, pencemaran udara karena tercemar oleh gas hasil buangan dari kegiatan pertambangan, maupun polusi suara karena kegiatan pertambangan seperti (*blasting*) ataupun truk pengangkut barang tambang. Kerusakan jalan yang disebabkan oleh kegiatan pertambangan baik pengangkutan keperluan pertambangan seperti alat berat maupun kebutuhan bahan bakar juga turut memberikan dampak negatif terhadap kondisi fisik di daerah sekitar pertambangan. Dampak kondisi fisik merupakan dampak yang ditimbulkan oleh adanya aktivitas pertambangan pada kondisi pencemaran pada air, udara, polusi suara, kerusakan jalan dan pembukaan hutan di sekitar wilayah pertambangan.

Listiyani (2017) menguraikan dampak negatif kegiatan pertambangan adalah sebagai berikut:

1. Usaha pertambangan dalam waktu relatif singkat dapat mengubah bentuk topografi tanah dan keadaan permukaan tanah sehingga dapat mengubah keseimbangan sistem ekologi bagi daerah sekitarnya.

2. Usaha pertambangan dapat menimbulkan berbagai macam gangguan, antara lain pencemaran akibat debu dan asap yang mengotori udara dan air, limbah air, tailing, serta buangan tambang yang mengandung zat-zat beracun.
3. Pertambangan yang dilakukan tanpa mengindahkan keselamatan kerja dan kondisi geologi lapangan dapat menimbulkan tanah longsor, ledakan tambang, keruntuhan tambang, dan gempa.

Potensi masalah dari kegiatan pertambangan yang paling umum dijumpai adalah risiko terbentuknya air asam tambang, air yang terbentuk akibat dari adanya oksidasi batuan sulfida tertentu yang berada di dalam lapisan batubara, sehingga mengakibatkan air yang ada di lokasi pertambangan bersifat asam dan biasanya air asam ini mengandung logam berat seperti besi dan mangan, dan seringkali mengandung zat padat tersuspensi yang memiliki konsentrasi tinggi. Dampak yang ditimbulkan air asam tambang bukan hanya di dalam lokasi pertambangan saja namun yang lebih dikhawatirkan adalah tercemarnya sumber air yang terdapat di luar kawasan tambang dan sangat membahayakan lingkungan, khususnya makhluk hidup (Andrawina dkk, 2020).

Logam berat yang terlarut di dalam air sangat berbahaya bagi kesehatan manusia walaupun dalam jumlah kecil, karena dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Berdasarkan Undang-undang No. 3 Tahun 2020 tentang Perubahan Atas UU Nomor 4 Tahun 2009 Pertambangan Mineral dan Batubara serta Undang-undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, pelaku usaha pertambangan harus bertanggungjawab terhadap berbagai dampak lingkungan yang ditimbulkannya, apabila pelaku usaha pertambangan dianggap lalai dalam melakukan pengelolaan lingkungan maka dapat dikenakan sanksi berupa denda maupun pidana (Perala dkk, 2022).

II.2.1 Pencemaran Logam Berat

Logam berat sejatinya unsur penting yang dibutuhkan setiap makhluk hidup. Sebagai *trace element*, logam berat yang esensial seperti tembaga, selenium, besi dan seng penting untuk menjaga metabolisme tubuh manusia dalam jumlah yang tidak berlebihan, jika berlebihan akan menimbulkan toksik pada tubuh. Logam yang termasuk elemen mikro merupakan kelompok logam berat yang nonesensial yang tidak mempunyai fungsi sama sekali dalam tubuh. Logam tersebut bahkan sangat berbahaya dan dapat menyebabkan keracunan pada manusia yaitu: timbal, merkuri, arsenik dan kadmium (Agustina, 2014).

Menurut Rusman (2010) dalam Tahril dan Irwan (2012), logam berat masih termasuk golongan logam dengan kriteria yang sama dengan logam-logam lain. Perbedaannya terletak pada pengaruh yang diakibatkan bila logam ini diberikan dan atau masuk ke dalam tubuh organisme hidup. Meskipun semua logam berat dapat mengakibatkan keracunan pada makhluk hidup, namun sebagian dari logam berat tersebut tetap dibutuhkan dalam jumlah yang sangat kecil. Bila kebutuhan yang sangat sedikit itu tidak dipenuhi, maka dapat berakibat fatal bagi kelangsungan hidup makhluk hidup.

Pencemaran lingkungan oleh logam berat dapat terjadi apabila proses produksi oleh industri dan pertambangan yang menggunakan logam berat tidak memperhatikan keselamatan lingkungan, khususnya dalam membuang limbah. Logam-logam tertentu dalam konsentrasi tinggi akan sangat berbahaya bila ditemukan di lingkungan. Tanah dan air merupakan dua komponen yang menjadi sasaran pencemaran, bila tanah dan air tercemar logam berat maka logam berat akan masuk ke dalam rantai makanan (Agustina. 2014).

Logam berat dapat menimbulkan efek kesehatan bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh. Daya racun yang dimiliki akan bekerja sebagai penghalang kerja enzim, sehingga proses metabolisme tubuh terputus. Lebih jauh lagi, logam berat akan bertindak sebagai alergen, mutagen, atau karsinogen bagi manusia. Jalur masuknya adalah melalui kulit, pernafasan, dan pencernaan. Masing-masing logam berat memiliki dampak negatif terhadap manusia jika dikonsumsi dalam jumlah yang besar dalam waktu yang lama. (Tahril dan Irwan 2012).

Salah satu logam berat pada air asam tambang yang berbahaya bagi manusia adalah besi (Fe). Besi merupakan logam berat yang dibutuhkan dalam proses untuk menghasilkan oksidasi enzim *cytochrome* dan pigmen pernapasan (haemoglobin). Logam ini akan menjadi racun apabila keadaannya terdapat dalam konsentrasi di atas normal. Kandungan besi dalam air dapat berasal dari larutan batuan-batuan yang mengandung senyawa Fe seperti Pirit. Dalam buangan limbah industri kandungan besi berasal dari korosi pipa-pipa air mineral logam sebagai hasil elektro kimia yang terjadi pada perubahan air yang mengandung padatan larut mempunyai sifat menghantarkan listrik dan ini mempercepat terjadinya korosi. Logam besi merupakan logam esensial yang keberadaannya dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme hidup, namun dalam jumlah berlebih dapat menimbulkan efek racun (Kamarati dkk, 2018).

Kandungan unsur besi di air tanah banyak terjadi. Air tanah yang umumnya mempunyai konsentrasi karbondioksida yang tinggi dapat menyebabkan kondisi anaerobik. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi besi bentuk mineral tidak larut (Fe^{3+}) tereduksi menjadi besi yang larut dalam bentuk ion bervalensi dua (Fe^{2+}). Konsentrasi besi pada air tanah bervariasi mulai dari 0,01 mg/l - 25 mg/l (Wiyata, 2003 dalam Asmaningrum 2016).

Menurut Dharma (2002) dalam Asmaningrum (2016), kehadiran ion Fe^{2+} yang terlarut dalam air dapat menimbulkan gangguan-gangguan seperti :

1. Rasa dan bau logam yang amis pada air, disebabkan karena bakteri mengalami degradasi
2. Besi dalam konsentrasi yang lebih besar 25 mg/l, akan memberikan suatu rasa pada air yang menggambarkan rasa metalik, astrinogen atau obat
3. Mengakibatkan pertumbuhan bakteri besi *Crenothrix* dan *Gallionella* yang berbentuk filamen.
4. Menimbulkan warna kecoklat-coklatan pada pakaian putih
5. Meninggalkan noda pada bak-bak kamar mandi dan peralatan lainnya (noda kecoklatan disebabkan oleh besi)
6. Dapat mengakibatkan penyempitan atau penyumbatan pada pipa
7. Endapan logam ini juga yang dapat memberikan masalah pada sistem penyediaan air secara individu (sumur).

Air yang mengandung zat besi cenderung menimbulkan rasa mual apabila dikonsumsi, selain itu dalam dosis yang besar dapat merusak dinding usus halus. Kematian sering terjadi akibat rusaknya dinding usus halus. Wiyata (2003) dalam Asmaningrum (2016) kandungan zat besi yang melebihi 1 mg/L akan menyebabkan terjadinya iritasi pada mata dan kulit. Apabila kelarutan besi dalam air melebihi 10 mg/L akan menyebabkan air menjadi berbau.

Hal yang sama dikemukakan oleh Riskawati (2019), kelebihan zat besi dapat menyebabkan rasa logam di mulut, gusi berdarah, iritasi, kulit menjadi kehitam-hitaman. Lebih lanjut, kelebihan zat besi juga dapat menyebabkan sakit kepala, diare, mudah lelah, penuaan dini, mudah marah, mudah emosi, keracunan, insomnia, kerusakan usus, gagal hati, hepatitis, rematik, sembelit, hipertensi, hingga kematian mendadak.

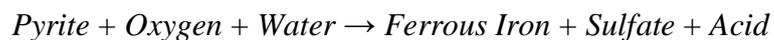
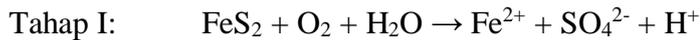
II.2.2 Air Asam Tambang (AAT)

Air asam tambang disingkat AAT merupakan limbah pencemar lingkungan yang terjadi akibat aktivitas pertambangan. Air asam tambang atau disebut juga dengan *Acid Mine Drainage* adalah air yang bersifat asam dan mengandung zat besi dan sulfat yang terbentuk sebagai hasil reaksi dari mineral sulfida, khususnya pirit, yang bereaksi dengan oksigen serta air. Air asam tambang mempunyai tingkat keasaman (pH) yang bernilai 6 atau lebih rendah (Alghifary dan Yeremia 2021). Kondisi pH yang rendah menyebabkan peningkatan kelarutan logam berat di dalam air. Akibatnya air asam tambang dengan keasaman tinggi dan kaya akan logam berat secara langsung maupun tidak langsung mempengaruhi lingkungan dan kehidupan organisme (Yunus dan Prihatini, 2018). Air asam tambang mengandung sulfat dan logam berat yang bersifat toksik seperti Besi (Fe), Mangan (Mn), Kadmium (Cd), Aluminium (Al), Sulfat (SO_4) (Hidayat, 2017).

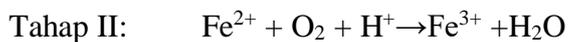
Pirit (FeS_2) merupakan senyawa yang umum dijumpai di lokasi pertambangan. Selain pirit, masih ada berbagai macam mineral sulfida yang terdapat dalam batuan dan berpotensi membentuk air asam tambang seperti markasit (FeS_2), Pirotit (Fe_xS_x), Kalkosit (Cu_2S), Kovelit (CuS), Molibdenit (MoS_2), Kalkopirit (CuFeS_2), Galena (Pbs), Spalerit (ZnS), dan Arsenopirit (FeAsS) (Hidayat, 2017).

Air asam tambang adalah istilah yang digunakan untuk merujuk pada air asam tambang yang timbul akibat kegiatan penambangan serta sering juga disebut air rembesan (*seepage*), atau aliran (*drainage*). Kualitas air tambang, asam atau alkali, bergantung pada ada atau tidaknya kandungan mineral asam (sulfida) dan material alkali (material karbonat) pada area yang ditambang (Hidayat, 2017).

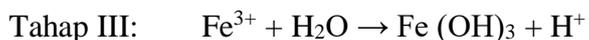
Tiga unsur Pembentuk air asam tambang adalah air, mineral sulfida, dan oksigen. Berikut ini adalah adalah reaksi pembentukan air asam tambang secara kimiawi, yaitu oksidasi dari mineral-mineral sulfat yang menyebabkan keasaman dari air tambang (Abfertiawan, 2016):



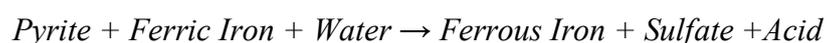
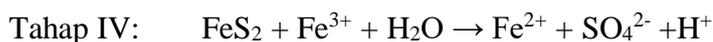
Reaksi pertama adalah reaksi pelapukan dari pyrite (pirit) disertai proses oksidasi. Sulfur dioksidasi menjadi sulfat dan besi-fero dilepaskan.



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



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



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

Air asam yang mengandung logam berat yang mengalir ke sungai, danau atau rawa akan merusak kondisi ekosistem yang ada di perairan tersebut. Hal ini tentunya akan menyebabkan terjadinya penurunan kualitas terhadap air. Air asam tambang dapat juga mempengaruhi bentang alam, perubahan struktur tanah, perubahan pola aliran permukaan dan air tanah serta komposisi kimia air permukaan (Hidayat, 2017).

Air asam tambang dapat terjadi pada kegiatan penambangan baik itu tambang terbuka maupun tambang bawah tanah. Umumnya keadaan ini terjadi karena unsur sulfur yang terdapat di dalam batuan teroksidasi secara alamiah didukung juga dengan curah hujan yang tinggi semakin mempercepat perubahan oksidasi sulfur menjadi asam. Sumber-sumber air asam tambang antara lain berasal dari (Hidayat, 2017):

1. Air dari tambang terbuka

Lapisan batuan akan terbuka sebagai akibat dari terkupasnya lapisan penutup, sehingga unsur sulfur yang ada dalam batuan sulfida akan terpapar oleh udara maka terjadilah oksidasi yang apabila hujan atau air tanah mengalir di atasnya maka jadilah air asam tambang.

2. Air dari unit pengolahan batuan buangan

Material yang banyak terdapat limbah kegiatan penambangan adalah batuan buangan (*waste rock*). Jumlah batuan buangan ini akan semakin meningkat dengan bertambahnya kegiatan penambangan. Akibatnya batuan buangan yang banyak mengandung sulfur akan berhubungan langsung dengan udara membentuk senyawa sulfur oksida, selanjutnya dengan adanya air akan membentuk air asam tambang.

3. Air dari lokasi penimbunan batuan

Timbunan batuan yang berasal dari batuan sulfida dapat menghasilkan air asam tambang karena adanya kontak langsung dengan udara luar yang selanjutnya terjadi pelarutan akibat adanya air.

4. Air dari unit pengolahan limbah *Tailing*

Kandungan unsur sulfur di dalam tailing diketahui mempunyai potensi dalam membentuk air asam tambang, pH dalam tailing pond ini biasanya cukup tinggi karena adanya penambahan hydrated lime untuk menetralkan air yang bersifat asam yang dibuang kedalamnya.

5. Air dari tempat penimbunan bahan galian/*Stockpile*

Bahan galian batubara yang dihasilkan dari kegiatan penambangan diangkut dan dikumpulkan di stockpile untuk diolah dan dipasarkan. Pada proses pengiriman batubara ke konsumen terlebih dahulu dikecilkan ukurannya dengan metode penghancuran (*crushing*). Dalam proses penghancuran batubara disiram dengan air untuk mengurangi debu, dimana terkadang di dalam lapisan batubara terdapat mineral sulfida yang berpotensi membentuk air asam tambang.

Terbentuknya air asam tambang di lokasi penambangan akan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, diantaranya yaitu (Hidayat, 2017):

1. Bagi masyarakat sekitar

Dampak terhadap masyarakat di sekitar wilayah tambang tidak dirasakan secara langsung karena air yang dipompakan ke sungai telah dinetralkan dan selalu dilakukan pemantauan setiap hari untuk mengetahui temperatur, kekeruhan, dan pH. Namun, apabila terjadi pencemaran dan biota perairan terganggu maka binatang seperti ikan akan mati akibatnya mata pencaharian penduduk akan terganggu.

2. Bagi biota perairan

Terjadinya perubahan keanekaragaman biota perairan seperti plankton dan benthos, kehadiran benthos dalam suatu perairan dijadikan sebagai indikator kualitas perairan. Pada perairan yang baik dan subur benthos akan melimpah, begitupun sebaliknya pada perairan yang kurang subur bentos tidak akan mampu bertahan hidup.

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.

4. Kualitas air tanah

Ketersediaan unsur hara merupakan faktor yang paling penting untuk pertumbuhan tanaman. Tanah yang asam banyak mengandung logam-logam berat seperti besi, tembaga, seng yang merupakan unsur hara mikro. Akibatnya terjadi keracunan pada tanaman yang ditandai dengan busuknya akar tanaman sehingga tanaman menjadi layu dan akhirnya akan mati.

II.2.3 Penanggulangan Air Asam Tambang

Air Asam Tambang (AAT) merupakan salah satu dampak negatif yang ditimbulkan oleh kegiatan penambangan karena dapat merusak lingkungan sehingga penting untuk dikelola dengan baik. Secara umum pengolahan air asam tambang dapat digolongkan menjadi 2 yaitu:

1. *Active Treatment Technologies*

Adalah teknologi yang memerlukan operasi, perawatan dan pemantauan oleh manusia berdasarkan pada sumber energi eksternal dan menggunakan infrastruktur dan sistem yang direkayasa. Terdiri dari: Netralisasi (yang sering

termasuk presipitasi logam), penghilangan logam, presipitasi kimiawi, dan penghilangan sulfat secara biologi. Penetral yang paling umum digunakan pada perlakuan AAT skala besar adalah kapur, karena bahan tersebut tersedia secara komersial, mudah digunakan, teknologi telah terbukti, biayanya murah dan efektif digunakan serta dikelola dengan baik dalam hal kesehatan dan keselamatan kerja bagi penerapan skala besar. Menambahkan tawas pada air asam tambang sebelum dialirkan kesungai tujuannya untuk menjernihkan air (Hidayat, 2017).

2. *Passive treatment technologies*

Passive treatment technologies adalah suatu sistem pengolahan air yang memanfaatkan sumber energi yang tersedia secara alami seperti gradien topografi, energi metabolisme mikrob, fotosintesis dan energi kimia. Pendekatan bioteknologi dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat adalah salah satu cara yang digunakan dalam *passive treatment*. Menurut Prianto (2016) dalam Perala dkk (2022) dengan memanfaatkan aktivitas bakteri pereduksi sulfat, akumulasi sulfat akan menurun. 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.

II.3 Biochar

Biochar atau *biomassa charcoal* adalah arang berpori yang kaya karbon sebagai hasil konversi dari limbah organik melalui proses pembakaran dalam keadaan oksigen yang rendah atau tanpa oksigen pada suhu 200-500°C (Nurida, 2014). Biochar diproses sedemikian rupa sehingga mempunyai kemampuan adsorpsi yang tinggi terhadap bahan yang berbentuk larutan atau uap. biochar secara luas digunakan sebagai adsorben dan secara umum mempunyai kapasitas

yang besar untuk mengadsorpsi molekul organik, memiliki kemampuan menyerap anion, kation dan molekul dalam bentuk senyawa organik maupun anorganik, larutan ataupun gas. biochar terdiri dari berbagai mineral yang dibedakan berdasarkan kemampuan adsorpsi dan karakteristiknya (Syauqiah, 2011).

Biochar merupakan bahan basa yang dapat meningkatkan pH dan berkontribusi terhadap stabilisasi logam berat. Afinitas dari biochar juga berada pada permukaannya yang luas dan mengandung banyak pori yang dapat menyerap logam-logam berat (Hidayat 2019). Biochar memiliki karakteristik berpori berukuran nano hingga mikrometer. Hal ini menyebabkan dalam satu gram biochar bila semua dinding rongga pori direntangkan, luas permukaannya dapat mencapai ratusan hingga ribuan meter persegi. memiliki mikroporositas yang dominan dan luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga cocok dijadikan sebagai bahan adsorben yang dapat digunakan secara efisien dalam pengolahan airtercemar (Putri dkk, 2019).

Biochar merupakan adsorben yang baik dengan struktur permukaan yang luas yang memiliki bentuk seperti butiran atau serbuk. Kontaminan dalam air asam tambang akan terserap ke dalam biochar karena tarikan dari permukaan biochar yang lebih kuat dibandingkan dengan daya kuat yang menahan di dalam larutan. Senyawa-senyawa yang mudah terserap oleh biochar umumnya memiliki nilai kelarutan yang lebih kecil dari biochar. Kontaminan dapat masuk ke dalam pori biochar dan terakumulasi didalamnya, apabila kontaminan terlarut di dalam air dan ukuran pori kontaminan lebih kecil dibandingkan dengan ukuran pori biochar (Rinawati dkk, 2019).

Biochar dengan strukturnya yang berpori, dapat menyediakan habitat yang cocok bagi mikroorganisme. Biochar dengan diameter pori 0,3 hingga 30 μm dapat menjadi habitat yang baik bagi populasi bakteri. Adapun untuk ukuran partikel yang baik bagi habitat mikroba yaitu 80 mesh atau 0,177 mm, karena partikel dari biochar yang halus memiliki ketersediaan nutrisi yang lebih besar daripada partikel kasar. Sumber nutrisi yang baik bagi pertumbuhan mikroba harus tersedia secara lokal, tidak terbatas, tidak mahal, memiliki kapasitas penahanan air yang baik, tidak beracun, ramah lingkungan, mudah diproduksi, dapat mempertahankan pertumbuhan dan kelangsungan hidup mikroba.

II. 3.1 Biochar dari sekam padi

Sumber biochar terbaik adalah limbah organik khususnya limbah pertanian terutama yang sulit terdekomposisi atau dengan rasio C/N tinggi. Di Indonesia potensi penggunaan biochar cukup besar, hal ini dikarenakan bahan baku seperti residu pertanian cukup tersedia. Secara nasional, potensi biomas pertanian yang bisa dikonversi menjadi biochar diperkirakan sekitar 10,7 juta ton yang akan menghasilkan 3,1 juta ton biochar. Potensi tertinggi berasal dari sekam padi yaitu mencapai 6,8 juta t th^{-1} dan akan menghasilkan biochar sebesar 1,77 juta t th^{-1} atau sekitar 56,48% dari total potensi karbon aktif nasional. Potensi limbah sekam padi di Indonesia masih belum dimanfaatkan secara optimal. (Nurida, 2014).

Sekam padi merupakan lapisan keras yang meliputi kariopsis yang terdiri dari dua bentuk daun yaitu sekam kelopak dan sekam mahkota, Sekam tersusun dari jaringan serat-serat selulosa yang mengandung banyak silika dalam bentuk serabut-serabut yang sangat keras. Pada keadaan normal, sekam berperan penting melindungi biji beras dari kerusakan yang disebabkan oleh serangan jamur,

sehingga secara tidak langsung dapat melindungi biji dan juga menjadi penghalang terhadap penyusupan jamur (listiana dkk, 2021).

Sekam merupakan salah satu bentuk limbah pertanian yang pada proses penggilingan padi akan terpisah dari butir beras dan menjadi bahan sisa atau limbah penggilingan (listiana dkk, 2021). Limbah sekam padi merupakan material terbarukan yang kaya akan karbon sehingga dapat dikonversi menjadi biochar (Rinawati dkk, 2019).

Komponen utama yang terkandung di dalam sekam padi adalah selulosa (38%), hemiselulosa (18%), lignin (22%), dan SiO_2 (19%). Banyaknya kandungan senyawa karbon dan silika dalam sekam padi sehingga produk karbonisasinya berupa komposit karbon-silika. Biochar dari sekam padi dapat diperoleh melalui proses karbonisasi yang dilanjutkan dengan proses aktivasi. Proses aktivasi arang sekam padi untuk mendapatkan biochar dengan luas permukaan tinggi umumnya melalui penghilangan kandungan silika yang ada pada sekam padi. (Solihudin dkk, 2015). Sekam padi yang sudah dikarbonisasi dan telah menjadi biochar dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. sekam padi (a) hasil karbonisasi (b) biochar (Rinawati dkk, 2019)

II.3. 2 Pembuatan Biochar dari Sekam Padi

Pemanfaatan limbah organik sampai saat ini dilakukan melalui proses pembakaran tidak sempurna menjadi biochar menghasilkan CO₂, terdegradasi di lingkungan aerobik yang juga menghasilkan CO₂, atau terdegradasi dalam lingkungan anaerobik menghasilkan CO₂ serta CH₄ (Nurida, 2014).

Selain melalui proses pembakaran secara tidak sempurna, biochar juga dapat dihasilkan dengan melakukan aktivasi menggunakan bahan kimia. Daya serap biochar ditentukan oleh luas permukaan partikel dan kemampuan penyerapan dapat digunakan lebih tinggi apabila arang hayati tersebut dilakukan aktivasi dengan bahan-bahan kimia dan dengan pembakaran pada temperatur tinggi.

Proses pembuatan biochar terdiri dari 3 tahap (Danarto dkk, 2008):

- Tahap Dehidrasi, Tahap ini dilakukan dengan memanaskan bahan baku sampai suhu 105°C dengan tujuan untuk menghilangkan kadar air.
- Tahap karbonisasi, Tahap karbonisasi merupakan proses pirolisis yaitu proses dekomposisi thermal pada suhu 600 – 1100°C. Selama proses ini, unsur- unsur selain karbon seperti hidrogen dan oksigen dibebaskan dalam bentuk gas. Proses karbonisasi akan menghasilkan 3 komponen utama, yaitu karbon (arang), tar, dan gas (CO₂, CO, CH₄, H₂, dan lain-lain).
- Tahap Aktivasi, suatu perubahan fisika dimana luas permukaan karbon menjadi lebih besar karena hidrokarbon yang menyumbat pori-pori terbebaskan.

Ada 2 cara untuk melakukan proses aktivasi karbon, diantaranya:

- Aktivasi secara fisika, proses aktivasi dilakukan dengan mengalirkan uap atau udara pada suhu 800-1000°C

- Aktivasi secara kimia, metode ini dilakukan dengan merendam bahan baku pada bahan kimia seperti H_3PO_4 , ZnCl_2 , HCl , H_2SO_4 , CaCl_2 , K_2S , NaCl , dan lain-lain.

II.3.3 Mekanisme Biochar dalam Mengadsorpsi Logam Berat

Biochar memiliki struktur berpori, luas permukaan yang lebih besar dan gugus fungsi permukaan yang melimpah, yang secara efektif dapat memperbaiki sejumlah polutan logam berat. Saat ini mekanisme adsorpsi biochar pada polutan logam berat belum ditentukan, dan mekanisme utama umumnya dianggap sebagai berikut (Wang dkk, 2017):

1. Pertukaran ion dan adsorpsi

Adsorpsi pertukaran permukaan biochar adalah salah satu hal penting untuk pengurangan aktivitas logam berat. Semakin besar jumlah pertukaran kation, semakin kuat retensi logam berat. Sifat pertukaran ion adalah interaksi elektrostatik antara gugus muatan negatif pada permukaan biochar dan muatan positif di dalam tanah. Reaksi semacam ini, dengan energi adsorpsi yang lebih rendah, termasuk adsorpsi nonspesifik dan memiliki reversibilitas yang jelas.

2. Kopesipitasi

Biochar dapat secara efektif mengurangi aktivitas logam berat melalui adsorpsi dan disolusi-presipitasi mineral penyusun. Penambahan *biochar* dapat meningkatkan pH tanah, dan reaksi ion logam berat dengan $-\text{OH}$, PO_4^{3-} , CO_3^{2-} dapat membentuk presipitasi hidroksida, karbonat atau fosfat, yang secara efektif memadatkan polutan logam berat tersebut.

3. Kompleksasi

Kompleksasi ini penting untuk fiksasi ion logam berat dengan afinitas yang kuat. Sejumlah besar penelitian telah menunjukkan bahwa reaksi ion logam berat dengan gugus fungsi oksigenik seperti gugus hidroksil (-OH), gugus karboksil (-COOH) dan gugus amino (-NH₂) pada permukaan biochar memberikan kontribusi besar pada adsorpsi ion logam berat.

4. Penyerapan elektrostatik

Area permukaan yang lebih besar dan energi permukaan yang lebih tinggi sangat membantu biochar untuk menyerap polutan logam berat dengan kuat dan menghilangkannya dari tanah. Mekanisme remediasi biochar berbeda untuk polutan logam berat yang berbeda. Untuk ion logam berat yang sama, mekanisme adsorpsi berbeda ketika biochar berbeda. Efek adsorpsi biochar pada ion logam berat dipengaruhi oleh banyak faktor seperti bahan baku dari biochar, suhu pirolisis, pH tanah, sifat fisik dan kimia ion logam berat dan jumlah penambahan biochar.

II.4 Sedimen *Wetland*

Menurut Sulaiman (2008) dalam Arnol (2017), Sedimen merupakan bahan atau partikel yang terdapat dipermukaan bumi (baik yang berada di daratan maupun lautan), yang dapat mengalami proses pengangkutan dari kawasan yang satu ke kawasan yang lainnya. Kandungan materi organik yang tinggi dalam sedimen *wetland* menyediakan lingkungan yang ideal bagi bakteri pereduksi sulfat. Pengolahan air asam tambang dengan perlakuan sedimen *wetland* akan lebih murah dan mengurangi tenaga kerja dibandingkan jika pengolahan AAT dengan cara penambahan kapur.

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 dipakai untuk proses ekosistem alami pada penetralan kualitas air seperti pH dan kandungan logam terlarut dalam air (Sucahyo dkk, 2018).

Sedimen *wetland* merupakan media perlakuan yang umumnya digunakan untuk proses remediasi air asam tambang. Sedimen ini memiliki ekosistem yang sangat kompleks karena pengaruh interaksi fisik, kimia dan proses biologis yang mempengaruhi kualitas air. Umumnya ada dua jenis sistem pengolahan air asam tambang, yakni sedimen *wetland* aerobik dan anaerobik. *Wetland* yang bersifat aerobik melibatkan air bersih alkali, sedangkan *wetland* yang bersifat anaerobik melibatkan pencelupan bahan organik yang kaya akan substrat dan inokulum BPS untuk memperbaiki air asam metalik dan memungkinkan tercapainya reduksi besi dan senyawa sulfat (Ramambu dkk, 2020).

Pengolahan AAT dengan perlakuan *wetland* akan lebih murah dan mengurangi tenaga kerja dibandingkan pengolahan dengan cara penambahan kapur. Reduksi logam dalam air terkontaminasi menggunakan *wetland* dapat menurunkan kandungan seng 150 menjadi 0,2 mg/l, tembaga 55 menjadi 0,05 mg/l, besi 700 menjadi 1 mg/l dan mangan 80 menjadi 1 mg/l. Remediasi dengan *wetland* merupakan gabungan dari kemampuan mikroba yang meliputi: adsorpsi logam, bioakumulasi logam, oksidasi logam dan reduksi sulfat. Reduksi sulfat

menghasilkan sulfida yang mengendapkan logam sehingga mengurangi konsentrasi logam dalam larutan. Kandungan materi organik yang tinggi dalam sedimen *wetland* menyediakan lingkungan yang ideal untuk populasi bakteri pereduksi sulfat untuk proses presipitasi kompleks logam (Fahrudin, 2018).

II. 4.1 Sedimen Bakau

Mangrove merupakan ekosistem pesisir yang merupakan peralihan antara lingkungan darat dan laut, terletak di iklim tropis dan subtropis. Lingkungan ini ditemukan di zona di bawah pengaruh pasang surut, sehingga membuat mangrove mengalami variasi salinitas. Karakteristik penting lainnya dari sedimen ini adalah tidak adanya oksigen pada beberapa milimeter di bawah permukaan. Kurangnya oksigen, ditambah dengan kelimpahan bahan organik, menciptakan lingkungan yang optimal untuk beberapa kelompok organisme anaerob, seperti bakteri pereduksi sulfat (Taketani dkk, 2010).

Keanekaragaman mikroorganisme di dalam sedimen bakau sangat tinggi. Aktivitas bakteri tersebut tergantung pada ketersediaan karbon-karbon yang dioksidasi. Hal ini disebabkan kandungan sedimen mendukung pembentukan kerjasama lingkungan mikro aerobik dan anaerobik. Misalnya, penurunan kadar oksigen karena aktivitas mikroorganisme di ruang kaya bahan organik, akan membentuk lingkungan mikro anaerobik yang mendukung aktivitas mikroorganisme anaerobik fakultatif dan obligat. Hal ini menyebabkan timbulnya kelompok mikroorganisme dengan sifat fisiologi spesifik tertentu yang sesuai dengan kondisi lingkungan mikro tersebut. Salah satunya bakteri pereduksi sulfat (Yulma, 2019).

II.5 Bakteri Pereduksi Sulfat

Bakteri pereduksi sulfat merupakan sekelompok mikroorganisme prokariotik yang tersebar luas di lingkungan anoksik (dasar laut, dasar sungai dan dasar danau, lumpur, saluran usus manusia dan hewan, serta pada permukaan logam (Kushkevych dkk, 2021). Sejumlah bakteri pereduksi sulfat diantaranya *Desulfovibrio*, *Desulfainum*, *Desulfobacca*, *Desulfobulbus*, *Desulfococcus*, *Desulfonema*, *Desulfosarcina*, *Desulfobacter*, *Desulfobacula*, *Desulfofaba*, *Desulfotigumof*, *Desulfatibacillum*, *Desulfatitaleof*, *Desulfatitalea* yang memiliki peran dalam siklus karbon dan sulfur. (Zhou dkk, 2021).

Bakteri pereduksi sulfat memanfaatkan senyawa anorganik sebagai elektron donor atau elektron akseptor dalam aktivitas metabolismenya. Bakteri jenis ini memanfaatkan ion sulfur dalam bentuk sulfat dan tiosulfat sebagai akseptor elektron terminal dalam respirasi metabolismenya, yang kemudian direduksi menjadi sulfida (Posumah dan Dewianti, 2018).

Bakteri pereduksi sulfat hidup secara anaerob dan dapat ditemukan hampir pada semua tanah dan air terutama yang banyak mengandung bahan organik dengan suasana anaerob, termasuk sedimen bakau. Cara ini dilakukan dalam bioreaktor yang tidak diinokulasikan lagi mikroba dari luar karena secara alami sudah ada mikroba didalamnya dan menetap pada sedimen wetland. Penggunaan sedimen pada air asam tambang mampu meningkatkan pH air asam tambang, menurunkan kadar sulfat dan meningkatkan pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat sehingga dapat digunakan untuk penanggulangan pencemaran lingkungan akibat air asam tambang (Fahrudin dkk, 2014).

II.5.1 Peranan Bakteri Pereduksi Sulfat

Bakteri pereduksi sulfat merupakan bakteri yang mampu bertahan dalam kondisi sangat masam (*acidic*). Bakteri tersebut dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas lahan sulfat masam dan mengingat bahwa bakteri ini menyukai kondisi masam (asidofil) maka bakteri tersebut dapat juga diaplikasikan pada lingkungan –lingkungan yang tercemar sulfur seperti lahan pasca tambang batu bara, air drainase dan lahan tempat pembuangan limbah sludge kertas.

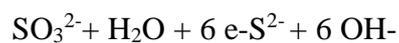
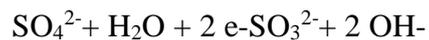
Bakteri pereduksi sulfat memiliki banyak peranan untuk mengurangi tingkat pencemaran lingkungan seperti mereduksi sulfat terlarut yang bisa memulihkan tingkat keasaman badan air menjadi pH 6-7, memicu terjadinya pengendapan logam berat sehingga akan menghilangkan pencemaran logam berat yang terlarut dalam perairan (Fahhrudin dan Abdullah, 2013). Selain itu, bakteri pereduksi sulfat ini umumnya bersifat anaerob dan dapat bereaksi dengan berbagai logam menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S). Terbentuknya hidrogen sulfida juga sangat menguntungkan terhadap lingkungan yang mengandung logam terlarut tinggi. Karena senyawa ini sangat reaktif dan bereaksi dengan logam membentuk logam sulfida yang sangat stabil (Purnamaningsih dkk, 2017).

Dalam melakukan proses reduksi sulfat, bakteri membutuhkan sumber energi yang diperoleh dari sulfat sebagai akseptor elektron dan bahan organik sebagai sumber karbon yang memiliki peran sebagai donor elektron dalam metabolisme serta bahan penyusun sel. Pada kondisi anaerob, bahan organik akan berperan sebagai donor elektron. Bakteri pereduksi sulfat telah lama dikenal sebagai kunci utama dari siklus karbon dan belerang (Sutanto dkk, 2021).

Reaksi reduksi sulfat oleh bakteri pereduksi sulfat adalah sebagai berikut (Sudarno dkk. 2018):



Sedangkan reaksi reduksi sulfat oleh air adalah sebagai berikut:



Proses reduksi sulfat oleh BPS menghasilkan endapan sulfida logam dan meningkatkan alkalinitas. Selain itu, peran substrat organik dalam proses remediasi AAT antara lain menghambat oksidasi pirit melalui mekanisme: konsumsi oksigen oleh bakteri selain *Thiobacillus ferrooxidans* dan *Thiobacillus thiooxidans*, pengambilan besi (III) dari larutan melalui kompleksasi, dan pembentukan kompleks pirit-besi (II)-humat (Sandrawati dkk, 2019).

Bakteri pereduksi sulfat juga berperan dalam kenaikan pH air asam tambang. Bakteri pereduksi sulfat akan memanfaatkan bahan organik sebagai sumber donor elektron dalam mereduksi sulfat menjadi sulfida dan menghasilkan bikarbonat yang akan meningkatkan pH. Pembentukan bikarbonat mengindikasikan kemampuan bakteri pereduksi sulfat dalam mengontrol pH di sekitar lingkungan mikronya (Sandrawati dkk, 2019).

Contoh bakteri pereduksi sulfat adalah bakteri *Vibrio desulfuricans*. Bakteri tersebut berbentuk koma, gram negatif, anaerobik, dapat diisolasi dari tanah. Mikroba tersebut berkembang pada suhu 30-55 °C dan mempunyai kemampuan menggunakan garam-garam organik sebagai sumber energi. Kultur pada temperatur rendah, misalnya 30°C akan terlihat sebagai spiral-spiral kecil, motil dengan satu atau dua flagella polar, sedangkan pada suhu lebih tinggi 55 °C, bergranula atau butiran (Waluyo, 2018).