

SKRIPSI
PENGARUH PEMBERIAN BIOCHAR DARI TEMPURUNG KELAPA
DAN SEDIMEN RAWA TERHADAP REDUKSI SULFAT DAN
LOGAM BERAT TIMBAL (Pb) PADA AIR ASAM TAMBANG

LULU DWIYANTI

H041 19 1036



DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023

**PENGARUH PEMBERIAN BIOCHAR DARI TEMPURUNG KELAPA
DAN SEDIMEN RAWA TERHADAP REDUKSI SULFAT DAN
LOGAM BERAT TIMBAL (Pb) PADA AIR ASAM TAMBANG**

SKRIPSI

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



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

2023

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PEMBERIAN BIOCHAR DARI TEMPURUNG KELAPA
DAN SEDIMEN RAWA TERHADAP REDUKSI SULFAT DAN
LOGAM BERAT TIMBAL (Pb) PADA AIR ASAM TAMBANG**

Disusun dan diajukan oleh:

LULU DWIYANTI

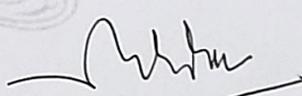
H041191036

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada 4 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing Utama

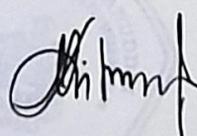
Pembimbing Pertama


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


Dr. Nur Haedar, S.Si., M.Si
NIP. 196801291997022001

Menyetujui,

Ketua Program Studi,


Dr. Magdalena Litaay, M.Sc
NIP. 196409291989032002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Lulu Dwiyanti
NIM : H041191036
Program Studi : Biologi
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Pengaruh Pemberian Biochar dari Tempurung Kelapa dan Sedimen Rawa terhadap Reduksi Sulfat dan Logam Berat Timbal (Pb) pada Air Asam Tambang

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri

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

Makassar, 4 Agustus 2023

Yang menyatakan


Lulu Dwiyanti



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Pemberian Biochar dari Tempurung Kelapa dan Sedimen Rawa terhadap Reduksi Sulfat dan Logam Berat Timbal (Pb) pada Air Asam Tambang”. Shalawat serta salam tak lupa penulis curahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Dalam pelaksanaan penelitian sampai diselesaikannya skripsi ini, penulis mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya dan sebesar-besarnya kepada orang tua tercinta, Bapak Edhy Suyanto dan Ibu Umi Kalsum, S.Pd yang tiada hentinya mendoakan dan memberi dukungan moral dan materi serta pengorbanannya kepada penulis. Tidak lupa pula penulis ucapkan terima kasih kepada kedua saudara penulis, Kakak Ipunk Sugiarti, S.Pd., M.Pd dan Adik Haniatur Rahma atas doa dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

Ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya penulis sampaikan juga kepada Prof. Dr. Fahrudin, M.Si selaku Pembimbing Utama dan Dr. Nur Haedar, S.Si., M.Si selaku Pembimbing Pertama atas waktu, tenaga dan pikiran yang telah diberikan dalam memberikan bimbingan, arahan dan motivasi berupa kritik dan saran serta dengan sabar membimbing penulis hingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan menyusun skripsi ini.

Selain itu, tersusunnya skripsi ini tidak lepas dari doa dan dukungan berbagai pihak. Untuk itu, ucapan terima kasih penulis juga disampaikan kepada Dr. Eng. Amiruddin, selaku Dekan FMIPA Universitas Hasanuddin beserta seluruh

jajarannya; Dr. Magdalena Litaay, M.Sc. selaku Ketua Departemen Biologi, FMIPA Universitas Hasanuddin; Dr. Nur Haedar, S.Si., M.Si selaku Dosen Penasihat Akademik (PA); tim dosen penguji Dr. Ir. Slamet Santosa, M.Si dan Dr. Rosana Agus, M.Si; Bapak dan Ibu Dosen serta staf dan pegawai Departemen Biologi, FMIPA Universitas Hasanuddin; kak Fuad Gani, S.Si dan Faisal, S.Si; rekan seperjuangan penelitian penulis; sahabat “SL” penulis; teman spesial penulis Muhammad Syarif; teman-teman “Sci-Fi” penulis; teman-teman Biologi 2019, Biot19ris “Bersama, Bersatu, Berproses” dan MIPA 2019 “Selamanya Tetap Ada” penulis; teman-teman KKN Gelombang 108 UNHAS di posko Pulau Kapoposang, Desa Mattiro Ujung, Kecamatan Liukang Tupabbiring, Kabupaten Pangkep dan Kepulauan, Provinsi Sulawesi Selatan; KMF MIPA UNHAS dan HIMBIO FMIPA UNHAS sebagai wadah dalam pengembangan *skill* berorganisasi yang tidak dapat diperoleh di bangku perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, baik dari segi materi maupun pengalaman yang dimiliki. Oleh karena itu, semua kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan oleh penulis untuk penyempurnaan tugas akhir ini. Penulis juga berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Wassalamu’alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Makassar, 4 Agustus 2023

Penulis

ABSTRAK

Air Asam Tambang (AAT) merupakan hasil dari aktivitas pertambangan yang menimbulkan permasalahan lingkungan dan dapat ditanggulangi dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat (BPS) yang berasal dari sedimen rawa dengan penambahan biochar dari tempurung kelapa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemberian biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa dalam menurunkan kadar logam berat timbal (Pb), menurunkan kadar sulfat, meningkatkan pH, dan menghitung total mikroba pada perlakuan AAT. Kadar logam berat timbal (Pb) diukur menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS), kadar sulfat diukur menggunakan metode Spektrofotometer UV-Vis, perubahan pH diukur menggunakan pH meter, dan total mikroba dihitung menggunakan metode *Standard Plate Count* (SPC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa pada perlakuan AAT yang paling baik dalam menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) adalah P1 yaitu 0,52 ppm, sedangkan P4 (kontrol) hanya mampu menurunkan kadar logam timbal (Pb) sebesar 1,57 ppm. Pemberian biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa pada perlakuan AAT yang paling baik dalam menurunkan kadar sulfat adalah P1 yaitu 67,265 mg/L, sedangkan P4 (kontrol) hanya mampu menurunkan kadar sulfat sebesar 168 mg/L. Pemberian biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa pada perlakuan AAT yang paling baik dalam meningkatkan pH adalah P1 yaitu 8,675, sedangkan P4 (kontrol) hanya mampu meningkatkan pH sebesar 2,19. Pemberian biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa pada perlakuan AAT yang paling signifikan dalam meningkatkan total mikroba adalah P1 yaitu $1,7 \times 10^5$ CFU/mL, sedangkan P4 (kontrol) hanya mampu meningkatkan total mikroba sebesar $1,0 \times 10^2$ CFU/mL.

Kata kunci : biochar, tempurung kelapa, sedimen rawa, air asam tambang, bakteri pereduksi sulfat

ABSTRACT

Acid Mine Drainage (AMD) is the result of mining activities that cause environmental problems and can be overcome by using sulfate reducing bacteria (SRB) derived from swamp sediment with the addition of biochar from coconut shells. This study aims to determine the effect of biochar from coconut shells and swamp sediment in reducing heavy metal lead (Pb) levels, reducing sulfate levels, increasing pH, and count total microbes in the AMD treatment. Heavy metal lead (Pb) levels were measured using the Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) method, sulfate levels were measured using the UV-Vis Spectrophotometer method, changes in pH were measured using a pH meter, and total microbes were calculated using the Standard Plate Count (SPC) method. The results showed that the administration of biochar from coconut shells and swamp sediment in the AMD treatment which was the best in reducing heavy metal lead (Pb) levels was P1 which was 0,52 ppm, while P4 (control) was only able to reduce heavy metal lead (Pb) levels by 1,57 ppm. The administration of biochar from coconut shells and swamp sediment in the AMD treatment which was the best in reducing sulfate levels was P1 which was 67,265 mg/L, while P4 (control) was only able to reduce sulfate levels by 168 mg/L. The administration of biochar from coconut shells and swamp sediment in the AMD treatment which was the best in increasing the pH was P1 which was 8,675, while P4 (control) was only able to increase the pH by 2,19. The administration of biochar from coconut shells and swamp sediment in the AMD treatment that was most significant in increasing the total microbes was P1 which was $1,7 \times 10^5$ CFU/mL, while P4 (control) was only able to increase the total microbes by $1,0 \times 10^2$ CFU/mL.

Keywords : biochar, coconut shells, swamp sediment, acid mine drainage, sulfate reducing bacteria

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN SAMPUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Tujuan Penelitian	4
I.3 Manfaat Penelitian	5
I.4 Waktu dan Tempat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Pencemaran Limbah Pertambangan.....	6
II.2 Air Asam Tambang (AAT).....	7
II.2.1 Pembentukan Air Asam Tambang	8
II.2.2 Dampak Negatif Air Asam Tambang	9

II.2.3 Penanggulangan Air Asam Tambang.....	10
II.3 Logam Berat pada Limbah Pertambangan.....	11
II.3.1 Logam Berat Timbal (Pb).....	12
II.4 Sedimen <i>Wetland</i>	14
II.4.1 Sedimen Rawa.....	15
II.5 Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS).....	16
II.5.1 Habitat Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS).....	17
II.5.2 Peranan Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS)	18
II.6 Biochar..	19
II.6.1 Karakteristik Biochar.....	21
II.6.2 Mekanisme Penyerapan Logam Berat Timbal (Pb) oleh Biochar dari Tempurung Kelapa	23
II.6.3 Karbon Aktif Tempurung Kelapa	27
II.6.4 Pembuatan Karbon Aktif Tempurung Kelapa	29
BAB III METODE PENELITIAN	32
III.1 Alat	32
III.2 Bahan.....	32
III.3 Prosedur Penelitian.....	32
III.3.1 Sterilisasi Alat	32
III.3.2 Pengambilan Sampel	33
III.3.3 Pembuatan Air Asam Tambang (AAT).....	33
III.3.4 Aktivasi Arang Tempurung Kelapa.....	33
III.3.5 Karakterisasi Air Asam Tambang (AAT).....	34
III.3.6 Pembuatan Perlakuan.....	34

III.4 Analisis Data.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
IV.1 Perubahan Fisik Air Asam Tambang (AAT).....	38
IV.2 Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb)	41
IV.3 Pengukuran Kadar Sulfat.....	44
IV.4 Pengukuran pH.....	46
IV.5 Perhitungan Total Mikroba.....	48
BAB V PENUTUP	52
V.1 Kesimpulan.....	52
V.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

1. Tabel Hasil Pengukuran Kandungan Logam Berat Timbal.....	60
2. Tabel Hasil Pengukuran Kadar Sulfat.....	60
3. Tabel Hasil Pengukuran pH.....	60
4. Tabel Perhitungan Total Mikroba	61

DAFTAR GAMBAR

1. Karbon Aktif Tempurung Kelapa	27
2. Pembuatan Karbon Aktif Tempurung Kelapa	30
3. Perubahan Fisik Air Asam Tambang pada Hari ke-0	39
4. Perubahan Fisik Air Asam Tambang pada Hari ke-30	40
5. Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb)	41
6. Pengukuran Kadar Sulfat	44
7. Pengukuran pH	46
8. Perhitungan Total Mikroba	48
9. Foto Pengambilan Sampel	61
10. Foto Persiapan dan Aktivasi Arang Tempurung Kelapa	61
11. Foto Pembuatan Perlakuan AAT	62
12. Foto Pembuatan Media dan Persiapan Pengerjaan	63
13. Foto Pengambilan Sampel untuk Uji Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Kadar Sulfat, Pengukuran pH, dan Inokulasi Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS) serta Perhitungan Total Mikroba	64
14. Foto Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb)	65
15. Foto Analisis Kadar Sulfat	66

DAFTAR LAMPIRAN

1. Tabel Hasil Pengukuran	60
2. Foto Pengambilan Sampel	61
3. Foto Persiapan dan Aktivasi Arang Tempurung Kelapa	61
4. Foto Pembuatan Perlakuan AAT	62
5. Foto Pembuatan Media dan Persiapan Pengerjaan	63
6. Foto Pengambilan Sampel untuk Uji Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Kadar Sulfat, Pengukuran pH, dan Inokulasi Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS) serta Perhitungan Total Mikroba.....	64
7. Foto Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb).....	65
8. Foto Analisis Kadar Sulfat	66

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kegiatan pertambangan merupakan suatu kegiatan eksplorasi, pengamatan, penelitian, pengambilan, pemanfaatan, pengelolaan, dan pemasaran atau jual beli hasil alam (UU Mineralogi No. 4 Tahun 2009). Pertambangan merupakan kegiatan yang memberikan dampak dan pengaruh bagi dalam dan luar negeri terutama dalam permasalahan ekonomi, akan tetapi aktivitas pertambangan juga memberikan dampak negatif yang luas akibat proses penggalian dan perubahan *landskap* (Surianti *et al.*, 2021). Tujuan industri pertambangan adalah untuk memenuhi kebutuhan energi dan sumber daya mineral, meningkatkan pembangunan infrastruktur dan kualitas hidup masyarakat. Pertambangan telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kemajuan peradaban manusia dan ekonomi nasional. Aktivitas pertambangan juga telah menyebabkan degradasi lingkungan yang serius (Ayangbenro *et al.*, 2018).

Kegiatan pertambangan menghasilkan sejumlah besar bahan beracun atau korosif dan mudah terbakar. Lokasi pertambangan dikelilingi oleh timbunan limbah, kolam tailing dan bahan-bahan kimia hasil pengolahan. Limbah tambang merupakan hasil samping dari aktivitas pertambangan yang tidak memiliki nilai ekonomis. Limbah tambang terdiri atas abu, debu asap, sedimen lepas, logam, terak, limbah metalurgi, tailing pabrik, bahan bakar, mineral, bijih, emisi partikulat, bahan kimia, dan batu. Aliran limbah menuntut perencanaan dan pengambilan keputusan dalam hal pengurangan limbah, pemulihan sumber daya, pembuangan limbah, dan

perlindungan lingkungan. Pelepasan limbah pertambangan ke lingkungan dapat berdampak signifikan terhadap sumber daya air permukaan, air tanah, udara, dan tanah (Ayangbenro *et al.*, 2018).

Salah satu limbah pertambangan yang berbahaya adalah cairan asam sulfat yang dapat menurunkan pH air di bawah 6 dan melarutkan ion-ion logam. Asam sulfat yang terbentuk dari kegiatan pertambangan dikenal dengan Air Asam Tambang (AAT) atau *Acid Mine Drainage* (AMD). Karena bersifat asam, air asam tambang yang mencemari air dapat mematikan ikan dan organisme. Di darat, air asam tambang akan menghambat pertumbuhan tanaman karena mengubah pH tanah menjadi asam. Selain itu, air asam tambang juga melarutkan logam-logam berat, sehingga akan menimbulkan pencemaran logam pada lingkungan perairan (Arnol *et al.*, 2018).

Logam berat merupakan komponen alami yang terdapat di kulit bumi yang tidak dapat didegradasi ataupun dihancurkan dan merupakan zat yang berbahaya karena dapat terjadi bioakumulasi. Menurut Agustina (2014), sumber utama kontaminan logam berat berasal dari udara dan air yang mencemari tanah. Salah satu logam berat yang dapat berpotensi menjadi racun jika berada di dalam tanah dengan konsentrasi berlebih adalah timbal (Pb). Logam Pb adalah salah satu logam yang terkandung di dalam air asam tambang karena berasal dari aktivitas pertambangan (Fika *et al.*, 2021). Pb merupakan salah satu logam berat beracun dan berbahaya, banyak ditemukan sebagai pencemar dan cenderung mengganggu kelangsungan hidup organisme baik di darat maupun di air (Arkianti *et al.*, 2019).

Untuk mengolah limbah dari pertambangan agar berlangsung secara efektif, terjangkau dan tentunya ramah lingkungan, dapat dilakukan dengan menggunakan

pengolahan limbah pertambangan secara biologi, yaitu bioremediasi. Bioremediasi adalah metode pengolahan limbah hasil pertambangan dengan memanfaatkan mikroorganisme dalam menanggulangi bahan pencemar yang terkandung di dalamnya untuk memulihkan lahan dan perairan yang tercemar akibat limbah pertambangan. Salah satu alternatif bioremediasi adalah menggunakan bakteri pereduksi sulfat (BPS) untuk mereduksi sulfat dan menurunkan konsentrasi logam berat yang terkandung di dalam limbah pertambangan. Bakteri pereduksi sulfat dapat diperoleh dari substrat-substrat berlumpur seperti sedimen, salah satunya sedimen rawa (Fahrudin *et al.*, 2014). Di dalam sedimen terjadi aktivitas biokimia akibat adanya aktivitas mikroba pada lingkungan tersebut yang terjadi secara alami yang dapat melepaskan kontaminan seperti logam berat (Arnol *et al.*, 2018). Bakteri pereduksi sulfat dapat mengendapkan ion-ion logam yang toksik seperti timbal (Pb), besi (Fe), tembaga (Cu), mangan (Mn), seng (Zn), kadmium (Cd), dan nikel (Ni). Penanganan limbah pertambangan yang terkontaminasi oleh logam berat secara biologis dengan memanfaatkan bakteri pereduksi sulfat mampu menurunkan kadar logam berat hingga 95% (Purnamaningsih *et al.*, 2017).

Selain memanfaatkan bakteri pereduksi sulfat, penggunaan biochar juga merupakan cara yang digunakan untuk mereduksi logam berat pada air asam tambang. Menurut Guzali *et al.* (2016) dan Saleh *et al.* (2023), biochar merupakan suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon yang dihasilkan dari degradasi biomassa melalui pembakaran tidak sempurna atau *pyrolysis*. Bahan baku biochar dapat berasal dari hewan, tumbuh-tumbuhan, limbah maupun mineral yang mengandung karbon dan dapat menjadi arang, salah satunya dapat dibuat dari tempurung kelapa (Safitri *et al.*, 2018). Bahan organik dari limbah pertanian

yang mengandung lignin dan selulosa yang bertekstur keras seperti tempurung kelapa dapat dimanfaatkan dalam bentuk arangnya atau dikenal dengan biochar (Saleh *et al.*, 2023). Pemakaian biochar tempurung kelapa berpotensi untuk menurunkan daya toksisitas logam berat pada limbah pertambangan (Hidayat *et al.*, 2019). Biochar menyediakan habitat atau media tumbuh yang baik bagi mikroba tanah (Annisa dan Nursyamsi, 2016), seperti bakteri pereduksi sulfat (BPS) yang dimanfaatkan untuk memperbaiki sifat kimia tanah pada lahan bekas pertambangan. Bakteri pereduksi sulfat yang diperoleh dari sedimen rawa menggunakan sulfat sebagai sumber energi, yaitu sebagai akseptor elektron dengan menggunakan biochar sebagai tempat melekatnya bakteri pereduksi sulfat karena pori yang terdapat pada biochar menyediakan habitat yang cocok untuk mikroorganisme.

Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh pemberian biochar dari tempurung kelapa dengan perlakuan sedimen rawa sebagai sumber inokulum bakteri pereduksi sulfat terhadap reduksi sulfat dan logam berat timbal (Pb) pada air asam tambang.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui penurunan kandungan logam berat timbal (Pb) pada AAT dengan pemberian perlakuan biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa.
2. Untuk mengetahui penurunan kadar sulfat pada AAT dengan pemberian perlakuan biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa.

3. Untuk mengetahui peningkatan pH pada AAT dengan pemberian perlakuan biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa.
4. Untuk mengetahui jumlah koloni mikroba pada AAT dengan pemberian perlakuan biochar dari tempurung kelapa dan sedimen rawa.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pentingnya penanggulangan air asam tambang dengan memanfaatkan bakteri pereduksi sulfat yang diperoleh dari sedimen rawa yang ditambahkan biochar dari tempurung kelapa sebagai salah satu alternatif yang efektif untuk penanggulangan air asam tambang.

I.4 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Februari-April 2023 di Laboratorium Mikrobiologi, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Balai Besar Laboratorium Kesehatan (BBLK), Makassar. Pengambilan sampel sedimen rawa dilakukan di rawa depan Perumnas Antang, Makassar dan sampel air asam tambang dibuat secara sintetik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Pencemaran Limbah Pertambangan

Pertambangan merupakan suatu bidang usaha yang karena sifat kegiatannya pada dasarnya selalu menimbulkan perubahan pada alam lingkungannya (BPLHD Jabar, 2005). Aktivitas pertambangan ini mempunyai dua sisi. Sisi pertama adalah sebagai pemacu kemakmuran ekonomi negara. Sisi lainnya adalah menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan yang memerlukan bantuan tenaga, pikiran dan biaya yang cukup signifikan untuk proses pemulihannya. Permasalahan lingkungan dalam aktivitas pertambangan umumnya terkait dengan Air Asam Tambang (AAT) atau *Acid Mine Drainage* (AMD). Air tersebut terbentuk sebagai hasil oksidasi mineral sulfida tertentu yang terkandung di dalam batuan oleh oksigen di udara pada lingkungan yang berair (Marganingrum dan Noviardi, 2010).

Kegiatan pertambangan secara terbuka akan memicu kerusakan lingkungan. Lahan bekas tambang yang terbuka akan berpotensi pada terbukanya mineral pirit ke permukaan. Hal ini dapat berakibat terjadinya oksidasi mineral pirit dan membentuk SO_4^{2-} . Reaksi oksidasi tersebut terjadi secara biologi oleh bakteri *Thiobacillus thiooxidans* yang menghasilkan kemasaman pada tanah karena membentuk asam sulfat (Sandrawati *et al.*, 2019).

Apabila limbah pertambangan dibuang secara langsung ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan dapat menyebabkan terjadinya pencemaran tanah. Salah satu bahan pencemar yang menjadi indikator untuk mendeteksi terjadinya pencemaran tanah yang disebabkan oleh limbah pertambangan adalah cemaran

logam berat yang terkandung di dalamnya. Beberapa jenis logam berat yang merupakan bahan pencemar tanah adalah Timbal (Pb), Besi (Fe), Seng (Zn), Mangan (Mn), Tembaga (Cu), Kadmium (Cd), Merkuri (Hg), Kromium (Cr), Arsenik (As), dan Nikel (Ni) (Fika *et al.*, 2021).

II.2 Air Asam Tambang (AAT)

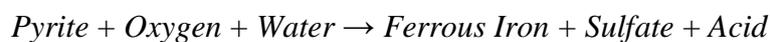
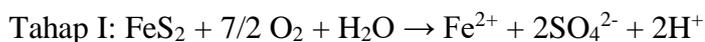
Air Asam Tambang (AAT) atau *Acid Mine Drainage* (AMD) adalah air yang bersifat asam dan mengandung zat besi dan sulfat, yang terbentuk akibat adanya aktivitas pertambangan sebagai hasil reaksi dari mineral sulfida, khususnya pirit, dengan oksigen dan air. Air asam tambang memiliki nilai tingkat keasaman (pH) yaitu 6 atau lebih rendah. Air asam tambang dapat terbentuk dari kegiatan pertambangan batubara maupun mineral, baik pada pertambangan permukaan maupun pertambangan bawah tanah (Alghifary dan Sihombing, 2021). Selain kandungan karbon organik yang rendah, air asam tambang memiliki pH rendah, konsentrasi sulfat dan logam yang tinggi, sehingga menyebabkan masalah lingkungan yang serius (Giordani *et al.*, 2019).

Kualitas air asam tambang (asam atau alkali), bergantung pada ada atau tidaknya kandungan mineral asam (sulfida) dan material alkali (karbonat) pada area yang ditambang. Umumnya material yang banyak mengandung mineral asam (sulfida) dan sedikit material alkali (karbonat) cenderung membentuk air asam tambang. Sebaliknya material yang banyak mengandung material alkali, mengandung material sulfida dengan konsentrasi yang banyak, sering menghasilkan air asam (Alghifary dan Sihombing, 2021).

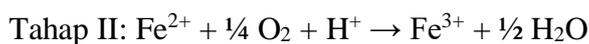
II.2.1 Pembentukan Air Asam Tambang

Air asam tambang akan terbentuk pada kondisi tertentu. Pembentukan air asam tambang dapat terjadi ketika terdapat mineral sulfida yang tersingkap akibat penggalian dan penimbunan batuan penutup yang kemudian mengalami oksidasi dan bereaksi dengan air hujan atau air permukaan. Beberapa logam sulfida yang sering dijumpai pada pertambangan mineral dan batubara antara lain FeS (*pyrite*), FeS₂ (*marcasite*), Fe_xS_x (*pyrrhotite*), PbS (*galena*), Cu₂S (*chalcocite*), CuS (*covellite*), CuFeS₂ (*chalcopyrite*), MoS₂ (*molybdenite*), NiS (*millerite*), ZnS (*sphalerite*), dan FeAsS (*arsenopyrite*) (Alghifary dan Sihombing, 2021).

Menurut Alghifary dan Sihombing (2021), reaksi pembentukan air asam tambang dapat dilihat berdasarkan tahapan reaksi berikut :



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



Reaksi kedua terjadi konversi dari besi ferro menjadi besi ferri yang menggunakan 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 dari 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 ferri.

II.2.2 Dampak Negatif Air Asam Tambang

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

1. Bagi masyarakat sekitar

Dampak terhadap masyarakat di sekitar wilayah pertambangan 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 hewan seperti ikan akan mati. Akibatnya, mata pencaharian penduduk akan terganggu.

2. Bagi biota perairan

Dampak negatif terhadap biota perairan adalah terjadinya perubahan pada keanekaragaman biota perairan seperti plankton dan bentos. Kehadiran bentos dalam suatu perairan dijadikan sebagai indikator kualitas perairan. Pada perairan yang baik dan subur, bentos akan melimpah, sebaliknya pada perairan yang kurang subur, bentos tidak akan mampu bertahan hidup.

3. Bagi kualitas air permukaan

Terbentuknya air asam tambang sebagai hasil oksidasi pirit, akan menyebabkan menurunnya kualitas air permukaan. Parameter kualitas air yang mengalami perubahan di antaranya 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 dan seng yang merupakan unsur hara mikro. Akibat kelebihan unsur hara mikro, dapat menyebabkan keracunan pada tanaman. Hal ini ditandai dengan busuknya akar tanaman, sehingga tanaman menjadi layu dan akhirnya mati.

II.2.3 Penanggulangan Air Asam Tambang

Pada umumnya, proses penetralan air asam tambang secara kimia dapat menggunakan kapur. Ada beberapa jenis kapur yang dapat digunakan, yaitu kapur pertanian (CaCO_3), kapur tohor (CaO), kapur dinding (Ca(OH)_2), dolomit ($\text{CaMg(CO}_3)_2$), dan kapur silika (CaSiO_3). Setiap jenis kapur memiliki level penetrasi yang berbeda. Semakin tinggi nilai penetrasi suatu kapur, maka semakin tinggi daya untuk meningkatkan pH yang berarti semakin sedikit jumlah kapur yang digunakan untuk meningkatkan pH dalam satu satuan (Utami *et al.*, 2020).

Secara fisika, untuk menetralkan air asam tambang dapat digunakan reaktor aliran vertikal dan saluran batu kapur anoksik (Utami *et al.*, 2020). Reaktor aliran vertikal digunakan sebagai sistem perawatan pasif untuk menghilangkan besi dari tambang perairan dengan tapak kurang dari setengah dari luas yang dibutuhkan oleh lahan basah aerobik konvensional (Blanco *et al.*, 2018). Air asam tambang dapat

dinetralkan secara efektif di bawah tanah dengan menggunakan saluran batu kapur anoksik. Karena reaksi antara air asam tambang dan batu kapur (CaCO_3), pH dan konsentrasi alkalinitas serta kalsium meningkat secara asimtotik dengan waktu penahanan di saluran batu kapur anoksik, sedangkan konsentrasi sulfat (SO_4), besi (Fe) dan mangan (Mn) biasanya tidak terpengaruh (Cravotta, 2003).

Secara biologi, untuk menetralkan air asam tambang dapat menggunakan bakteri pereduksi sulfat. Bakteri pereduksi sulfat dapat digunakan untuk memulihkan air asam tambang dengan memanfaatkan oksigen dan sumber karbon yang diperkaya. Bakteri pereduksi sulfat menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron terminal dengan SO_4^{2-} diubah menjadi H_2S . Isolasi bakteri pereduksi sulfat toleran asam, yang mengkatalisis reduksi sulfat menjadi sulfida yang mengubah asam sulfat menjadi hidrogen sulfida dan menghasilkan alkalinitas (Ayangbenro *et al.*, 2018).

II.3 Logam Berat pada Limbah Pertambangan

Logam adalah unsur alam yang dapat diperoleh dari laut, erosi batuan tambang, vulkanisme dan sebagainya. Umumnya logam-logam di alam ditemukan dalam bentuk senyawa dengan unsur lain, sangat jarang yang ditemukan dalam bentuk elemen tunggal. Unsur ini dalam suhu kamar tidak selalu berbentuk padat, melainkan ada yang berbentuk cair (Ainuddin dan Widyawati, 2017). Kandungan alamiah logam pada lingkungan dapat berubah-ubah, tergantung pada kadar pencemaran akibat ulah manusia atau perubahan-perubahan yang terjadi di alam, seperti erosi. Kandungan logam tersebut dapat meningkat bila limbah perkotaan, pertanian, pertambangan, dan perindustrian yang banyak mengandung logam berat masuk ke lingkungan (Agustina, 2014).

Logam berat memiliki sifat tidak biodegradable dan dapat bertahan untuk waktu yang lama pada tanah tercemar. Untuk menghilangkannya membutuhkan waktu yang relatif lama dan mahal (Haviz *et al.*, 2021). Logam berat secara alami sudah ada di dalam tanah dan tidak dapat terdegradasi, dapat menetap di tanah dan badan air untuk waktu yang lama, sehingga akan terus meningkat dari waktu ke waktu. Akumulasi logam yang ada pada tanah yang dapat mengakibatkan penurunan aktivitas mikroba tanah, penurunan kesuburan tanah dan kualitas tanah secara keseluruhan serta masuknya bahan beracun ke rantai makanan. Tanah dan air merupakan dua komponen yang menjadi sasaran pencemaran. Bila tanah dan air tercemar oleh logam berat, maka logam berat akan masuk ke dalam rantai makanan dan membentuk jaring-jaring makanan dan akhirnya menuju kepada manusia sebagai konsumen, sehingga menimbulkan berbagai macam penyakit pada manusia khususnya gangguan pada sistem saraf (Hidayat, 2015).

Menurut Hidayat (2015), sebab masuknya logam berat ke dalam lingkungan hidup adalah :

1. Longgokan alami di dalam bumi tersingkap, sehingga berada di permukaan bumi.
2. Pelapukan batuan yang mengandung logam berat yang melonggokkan logam berat secara residual di dalam saprolit dan selanjutnya berada di dalam tanah.
3. Penggunaan bahan alami untuk pupuk atau pembenah tanah (*soil conditioner*).
4. Pembuangan sisa dan limbah pabrik serta sampah.

II.3.1 Logam Berat Timbal (Pb)

Timbal (Pb) termasuk dalam kelompok logam berat golongan IVA dalam Sistem Periodik Unsur kimia, memiliki nomor atom 82 dengan berat atom 207,2,

berbentuk padat pada suhu kamar, bertitik lebur $327,4^{\circ}\text{C}$, dan memiliki berat jenis sebesar 11,4/L. Timbal (Pb) jarang ditemukan di alam dalam keadaan bebas, melainkan dalam bentuk senyawa dengan molekul lain, misalnya dalam bentuk PbBr_2 dan PbCl_2 (Gusnita, 2012). Timbal (Pb) merupakan logam yang sangat populer dan banyak dikenal oleh masyarakat awam. Hal ini disebabkan oleh banyaknya timbal (Pb) yang digunakan di industri nonpangan dan paling banyak menimbulkan keracunan pada makhluk hidup. Timbal (Pb) adalah sejenis logam yang lunak dan berwarna cokelat kehitaman serta mudah dimurnikan dari pertambangan (Agustina, 2014).

Dalam pertambangan, logam timbal (Pb) berbentuk sulfida logam PbS (galena). Senyawa ini banyak ditemukan di dalam pertambangan di seluruh dunia. Bahaya yang ditimbulkan oleh penggunaan timbal (Pb) ini adalah sering menyebabkan keracunan. Timbal (Pb) mempunyai sifat bertitik lebur rendah, mudah dibentuk dan mempunyai sifat kimia yang aktif, sehingga dapat digunakan untuk melapisi logam untuk mencegah perkaratan. Bila dicampur dengan logam lain, membentuk logam campuran yang lebih bagus daripada logam murninya dan mempunyai kepadatan melebihi logam lain (Agustina, 2014).

Timbal (Pb) merupakan racun saraf (neurotoxin) yang bersifat kumulatif, destruktif dan kontinu pada sistem haemofilik, kardiovaskular dan ginjal. Anak yang telah menderita toksisitas timbal cenderung menunjukkan gejala hiperaktif, mudah bosan, mudah terpengaruh, sulit berkonsentrasi terhadap lingkungannya termasuk pada pelajaran, dan akan mengalami gangguan pada masa dewasanya nanti, yaitu anak menjadi lamban dalam berpikir. Pada orang dewasa, umumnya ciri-ciri keracunan timbal adalah pusing, kehilangan selera, sakit kepala, anemia,

sukar tidur, lemah, dan keguguran kandungan. Selain itu, timbal berbahaya karena dapat mengakibatkan perubahan bentuk dan ukuran sel darah merah yang mengakibatkan tekanan darah tinggi (Gusnita, 2012).

Timbal (Pb) merupakan logam yang bersifat toksik terhadap manusia, yang bisa berasal dari tindakan mengkonsumsi makanan, salah satunya ikan. Ikan yang telah terkontaminasi timbal akan diakumulasi oleh tubuh, sehingga kandungan timbal dalam tubuh meningkat dan menyebabkan keracunan. Logam timbal (Pb) bisa menghambat aktivitas enzim yang terlibat dengan pembentukan hemoglobin (Hb) di dalam tubuh manusia dan sebagian kecil timbal diekskresikan lewat urin atau feses dan sebagian terikat protein, sedangkan sebagian lagi terakumulasi dalam ginjal, hati, kuku, jaringan lemak, dan rambut (Arkianti *et al.*, 2019).

II.4 Sedimen *Wetland*

Sedimen *wetland* (lahan basah air tawar) atau biasa disebut lahan basah terdiri dari beragam habitat, mulai dari lahan gambut dengan dan tanpa permafrost, rawa-rawa air tawar, lahan basah buatan untuk pengolahan air limbah, dan lahan basah pertanian. Pengurangan sulfat beroperasi pada tingkat yang sebanding dengan sedimen permukaan laut, dimana proses ini adalah jalur degradasi aerobik yang paling penting untuk bahan organik. Bakteri pereduksi sulfat yang diketahui biasanya tidak terdeteksi sama sekali atau hanya merupakan sebagian kecil dari mikrobiota lahan basah. Serangkaian penelitian memberikan bukti kumulatif untuk siklus belerang yang tersembunyi yang berkontribusi terhadap daur ulang cepat sulfida menjadi sulfat di lingkungan rendah sulfat dan dengan demikian mempertahankan laju reduksi sulfat tinggi yang diamati. Karena disimilasi sulfat

oleh bakteri pereduksi sulfat dengan degradasi karbon heterotrofik atau fiksasi karbon dioksida, reduksi sulfat secara langsung mempengaruhi siklus karbon di lahan basah (Pester *et al.*, 2012).

II.4.1 Sedimen Rawa

Rawa adalah area lahan bervegetasi yang tergenang sesekali. Banyak rawa yang terbentuk di sepanjang daerah aliran sungai besar, dimana sangat bergantung pada drainase alami, sementara yang lain terbentuk di tepi danau besar. Rawa berkembang dari lahan gambut, terkendala pada suhu yang berdrainase buruk dalam jaringan air yang kecil. Pelapukan kimia dan proses pemilahan selama transportasi, sedimentasi dan diagenesis memodifikasi komposisi kimia sedimen (Bessa *et al.*, 2020).

Lahan rawa adalah lahan yang sepanjang tahun atau selama waktu yang panjang dalam setahun selalu berupa air jenuh (*saturated water*) atau tergenang (*waterlogged*). Oleh karena itu, yang menjadi peranan utama dalam menggambarkan dinamika lahan rawa adalah fluktuasi air atau naik turunnya air permukaan di lahan (hidrologi). Kondisi ini dipengaruhi oleh bentuk topografi lahan yang umumnya datar sampai agak datar dan jarak dari lahan ke laut. Akibat fluktuasi air ini akan berpengaruh terhadap dinamika tanah gambut di dalamnya (Suriadikarta, 2012).

Di bawah lapisan rawa sering pula ditemukan tanah aluvial yang mengandung pirit. Tanah aluvial yang berasal dari endapan laut biasanya mengandung pirit. Pembentukan mineral sulfida ini terbentuk dari endapan sungai di pantai yang berkembang menjadi hutan pasang surut. Dekomposisi dalam massa yang padat dari bahan organik menghasilkan kondisi yang anaerob, sehingga

bakteri pereduksi sulfat menjadi banyak. Sulfida dihasilkan oleh bakteri tersebut dan terakumulasi dalam ruang pori-pori sebagai H₂S atau bergabung dengan besi membentuk endapan besi sulfida (FeS). Tanah aluvial yang langsung mendapat luapan air laut mempunyai kadar garam tinggi dengan susunan kation tukar: Na > Mg > Ca atau K. Tanah aluvial yang terkena pengaruh air payau susunan kation tukarnya: Mg > Ca > Na atau K, sedangkan yang tidak terkena air payau atau laut: Ca > Mg > Na atau K (Suriadikarta, 2012).

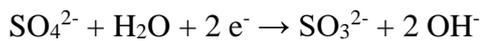
II.5 Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS)

Bakteri pereduksi sulfat (BPS) merupakan bakteri yang mempunyai kemampuan dalam bertahan pada kondisi sangat masam (*acidic*). Bakteri tersebut dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas lahan sulfat masam, mengingat bahwa bakteri pereduksi sulfat menyukai kondisi masam (asidofil), maka bakteri tersebut dapat diaplikasikan pada lingkungan-lingkungan yang tercemar sulfur seperti lahan pasca tambang batubara, air drainase dan lahan tempat pembuangan limbah *sludge* kertas (Sudarno *et al.*, 2018). Kelompok bakteri pereduksi sulfat ini terdiri dari prokariot dari domain *Bacteria* dan *Archaea*, mencakup lebih dari 220 spesies dari 60 genus yang berbeda (Kushkevych *et al.*, 2021). Bakteri pereduksi sulfat merupakan salah satu bakteri yang memanfaatkan senyawa anorganik seperti ion sulfur dalam bentuk sulfat dan tiosulfat sebagai elektron donor (akseptor elektron terminal) dalam aktivitas metabolismenya yang kemudian direduksi menjadi sulfida, seperti *Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* dan *Thiobacillus thiooxidans*. Bakteri pereduksi sulfat dapat ditemukan di sedimen, paling banyak ditemukan di dalam sedimen laut karena memiliki kandungan sulfat cukup tinggi (Posumah dan Rondonuwu, 2018).

Menurut Sudarno *et al.* (2018), reaksi reduksi sulfat oleh bakteri pereduksi sulfat adalah sebagai berikut :



Sedangkan reaksi reduksi sulfat oleh air adalah sebagai berikut :



II.5.1 Habitat Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS)

Bakteri pereduksi sulfat menghuni habitat yang sangat beragam. Organisme ini telah berhasil beradaptasi di hampir semua ekosistem di bumi, dari air tanah dan hewan, termasuk manusia. Bakteri pereduksi sulfat mencakup spesies yang hidup di darat, air baik air tawar maupun air laut, halofilik, termofilik, psikrofilik, mikroaerofilik (toleransi terhadap molekul oksigen), non-sporulasi, dan sporulasi. Pada saat yang sama, ada kemampuan beradaptasi yang besar terhadap suhu yang berbeda pada mikroorganisme ini. Selain di air dan tanah, bakteri pereduksi sulfat juga ditemukan hidup di makanan basi, perut ruminansia atau usus rayap, sumber air panas, lading minyak, dan usus besar hewan (Kushkevych *et al.*, 2021).

Habitat bakteri pereduksi sulfat cukup luas. Selain di lautan, bakteri ini juga dapat ditemukan di lahan sawah dan perairan darat. Bakteri ini merupakan bakteri anaerob obligat, sehingga bakteri pereduksi sulfat lebih banyak ditemukan pada lingkungan anoksik, terutama di bagian bawah sedimen. Jumlah dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat meningkat seiring dengan ketebalan lapisan sedimen. Namun demikian, terdapat kelompok bakteri pereduksi sulfat yang mampu tumbuh pada kondisi oksik. Hal ini yang menyebabkan ada keragaman bakteri yang tumbuh dalam sedimen. Kelompok bakteri *Desulfovibrio* sp. lebih dominan di bagian atas

sedimen, sedangkan kelompok bakteri *Desulfotomaculum* sp. banyak ditemukan pada bagian bawah sedimen (Yusron *et al.*, 2009).

II.5.2 Peranan Bakteri Pereduksi Sulfat (BPS)

Bakteri pereduksi sulfat (BPS) memiliki peran yang sangat diperlukan dalam siklus sulfur dan karbon di bumi (Kushkevych *et al.*, 2021). Bakteri pereduksi sulfat dapat bereaksi dengan berbagai logam menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) (Purnamaningsih *et al.*, 2017). 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 dan logam-logam terlarut dalam air asam tambang, sehingga terjadi peningkatan pH dan ion bikarbonat yang dihasilkan berperan sebagai *buffer* yang dapat meningkatkan pH (Suryatmana *et al.*, 2020).

Produk utama dari reduksi sulfat tergantung pada substrat yang dipakai. Jika substrat sebagai donor elektron yang dipakai adalah hidrogen, maka produknya adalah hidrogen sulfida. Jika bahan-bahan organik sederhana terutama laktat yang digunakan sebagai donor elektron, maka produknya adalah sulfida (Fahrudin *et al.*, 2014).

Bakteri pereduksi sulfat memiliki peranan untuk mengurangi tingkat pencemaran lingkungan seperti mereduksi sulfat terlarut yang dapat memulihkan tingkat keasaman air menjadi pH 6-7 dan memicu terjadinya pengendapan logam berat, sehingga akan menghilangkan pencemaran logam berat yang terlarut dalam perairan. Bakteri pereduksi sulfat efektif digunakan dalam proses bioremediasi tanah bekas tambang batubara. Bioremediasi tanah menggunakan BPS akan sangat

membantu kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang. Di alam, bakteri pereduksi sulfat sering berasosiasi dengan bakteri pereduksi besi (*iron reduction bacteria*) dalam bioremediasi lingkungan. Kedua jenis bakteri tersebut dapat dijumpai di lingkungan tanpa oksigen. Jika bakteri pereduksi sulfat menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron, maka bakteri pereduksi besi (BPB) menggunakan besi (III) sebagai akseptor elektron terminal (Posumah dan Rondonuwu, 2018).

II.6 Biochar

Biochar merupakan substansi arang kayu yang berpori (*porous*), sering juga disebut *charcoal* atau agri-char, karena berasal dari makhluk hidup disebut arang-hayati (Annisa dan Nursyamsi, 2016). Biochar atau arang adalah produk yang dihasilkan dari limbah biomassa yang dipanaskan tanpa udara atau dengan udara yang sangat sedikit. Proses pembuatan biochar ini sering disebut pirolisis (Fika *et al.*, 2021). Pirolisis adalah peristiwa kompleks, dimana senyawa organik dalam biomassa terkonversi melalui pemanasan tanpa atau dengan oksigen terbatas, sehingga yang terlepas hanya bagian *volatile matter*, sedangkan karbonnya tetap tinggal di dalamnya (Prasetyo *et al.*, 2020). Struktur pori yang berkembang dengan baik dan kapasitas penyangga asam-basa dari biochar bermanfaat bagi pertumbuhan mikroorganisme (Wang *et al.*, 2022).

Fungsi biochar sebagai bahan amelioran tanah karena biochar memiliki pH dan kapasitas tukar kation yang relatif tinggi (Tribuyeni *et al.*, 2016). Pembakaran dengan suhu yang lebih tinggi akan menurunkan produksi biochar, namun meningkatkan *fixed carbon*. Suhu selama proses produksi biochar sangat menentukan kandungan karbon, pH dan Kapasitas Tukar Kation (KTK) biochar

yang dihasilkan. Biochar mampu menyimpan karbon dalam waktu yang cukup lama dan dalam jumlah yang cukup besar. Waktu yang dibutuhkan dalam proses pembakaran hingga terbentuk biochar tergantung pada kadar air dan bentuk serta komposisi kimia limbah pertanian yang digunakan (Nurida, 2014).

Menurut data bahan baku biochar yang ada yang digunakan untuk adsorpsi timbal (Pb), bahan baku tersebut terutama dibagi menjadi enam kategori antara lain bahan kayu, limbah pertanian, residu hewan, lumpur, kulit buah, dan limbah lainnya (Wang *et al.*, 2022). Kualitas dari biochar sangat tergantung pada bahan yang digunakan seperti sekam padi, tempurung kelapa sawit, tempurung kelapa, dan lainnya; cara pengolahan menggunakan metode karbonasi seperti tipe alat pembakaran dan suhu; bentuk fisik biochar yaitu padat, serbuk dan karbon aktif; dan kondisi pirolisis (suhu, waktu dan lainnya) yang juga berpengaruh terhadap stabilitas dan fungsi unsur hara pada biochar (Yosephine *et al.*, 2021). Setiap biomassa mempunyai senyawa kimia yang berbeda karena adanya proses fotosintesis yang dilakukan oleh tumbuhan untuk menghasilkan energi dan nutrisi saat masih hidup. Biomassa mempunyai komposisi yang berbeda dan menjadi penentu utama dalam penilaian kualitas biochar (Prasetyo *et al.*, 2020).

Kapasitas biochar dalam mengurangi kehilangan nutrisi muncul dari sifat muatan dan luas permukaannya. Gugus fungsi biochar mempengaruhi proses penyerapan tergantung pada sifat muatan permukaannya, sehingga logam transisi dan logam non-transisi dapat diserap ke permukaan partikel biochar (Fellet *et al.*, 2011). Karena adanya struktur berpori yang tinggi dan berbagai gugus fungsi (misalnya karboksil, hidroksil dan gugus fenolik), biochar menunjukkan afinitas

yang besar untuk logam berat (Li *et al.*, 2017). Biochar memiliki sifat rekalsitran, yaitu lebih tahan terhadap oksidasi dan lebih stabil di dalam tanah (karena tersusun dari cincin karbon aromatis) apabila diaplikasikan untuk jangka waktu yang lama, sehingga memiliki pengaruh jangka panjang pula terhadap perbaikan kesuburan tanah (Rezeki *et al.*, 2021).

II.6.1 Karakteristik Biochar

Menurut Li *et al.* (2017), karakteristik biochar antara lain :

1. Luas Permukaan dan Porositas

Luas permukaan dan porositas merupakan sifat fisik utama yang mempengaruhi kapasitas penyerapan logam dari biochar. Ketika biomassa dipirolisis, mikropori terbentuk dalam biochar karena kehilangan air dalam proses dehidrasi. Ukuran pori biochar sangat bervariasi yang mencakup nano (<0,9 nm), mikro (<2 nm) dan makro (>50 nm).

Porositas biochar dan luas permukaan sangat bervariasi dengan suhu pirolisis. Suhu tinggi umumnya mengarah pada ukuran pori yang lebih besar, sehingga luas permukaannya lebih besar. Namun dalam beberapa kasus, biochar yang diproduksi pada suhu tinggi menghasilkan luas permukaan dan porositas yang lebih rendah. Pada suhu tinggi, struktur berpori biochar mungkin hancur atau tersumbat oleh tar, menyebabkan penurunan luas permukaan.

Selain suhu pirolisis, komposisi bahan baku biochar juga penting. Umumnya, biomassa yang kaya lignin seperti tempurung kelapa menghasilkan biochar berstruktur makropori, sedangkan biomassa yang kaya akan selulosa seperti sekam padi menghasilkan biochar berstruktur mikropori.

2. pH dan Muatan Permukaan

pH biochar bervariasi dengan suhu pirolisis dan bahan baku. Umumnya, biochar bersifat basa dengan beberapa pengecualian bergantung pada bahan baku. pH biochar meningkat seiring dengan meningkatnya suhu pirolisis. Peningkatan suhu menyebabkan komponen abu yang lebih tinggi, yang berkorelasi positif dengan pH biochar. Dengan meningkatnya suhu pirolisis, kandungan kation basa total dan karbonat dalam biochar juga meningkat, yang berkontribusi terhadap peningkatan pH. Selain itu, hilangnya gugus fungsi asam seperti $-\text{COOH}$ pada suhu tinggi merupakan kontributor lainnya.

Sifat penting lainnya yang mempengaruhi penyerapan logam berat oleh biochar adalah muatan permukaannya. Ketika biochar diterapkan pada air untuk menghilangkan logam, pH larutan sangat mempengaruhi muatan permukaannya. Pada suhu yang lebih tinggi, jumlah gugus fungsional bermuatan negatif pada biochar (misalnya $-\text{COO}^-$, $-\text{COH}$ dan $-\text{OH}$) berkurang, sehingga menghasilkan muatan permukaan yang kurang negatif.

3. Gugus Fungsional

Gugus fungsi seperti gugus karboksilat, amino dan hidroksil berperan penting dalam penyerapan logam. Suhu pirolisis dan bahan baku biochar adalah dua faktor kunci yang mengontrol jumlah gugus fungsi pada permukaan biochar. Namun, tidak seperti luas permukaan, porositas dan pH yang meningkat secara umum, kelimpahan gugus fungsi dalam biochar menurun dengan meningkatnya suhu, terutama karena tingkat karbonisasi yang lebih tinggi. Dengan meningkatnya suhu, rasio atom H/C, O/C dan N/C menurun, sehingga terjadi penurunan kelimpahan gugus hidroksil, karboksilat dan amino.

4. Komposisi Mineral

Komponen mineral seperti kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan fosfor (P) dalam biochar juga bertanggung jawab dalam penyerapan logam dari air. Komponen mineral dapat bertukar atau mengendap dengan logam berat dan mengurangi ketersediaannya. Suhu pirolisis dan bahan baku mengontrol jumlah komponen mineral dalam biochar. Konsentrasi total K, Ca, Mg, dan P meningkat dengan meningkatnya suhu pirolisis biochar.

Sifat biochar sangat bervariasi, terutama bergantung pada suhu pirolisis dan bahan baku. Namun, suhu bisa memiliki efek berlawanan pada sifat biochar, yang menyebabkan efek berlawanan pada penyerapan logam. Suhu pirolisis yang tinggi menyebabkan luas permukaan yang lebih tinggi, sehingga menyediakan lebih banyak tempat untuk penyerapan logam. Namun, hal ini mengurangi jumlah gugus fungsi yang dapat menyebabkan penyerapan logam yang lebih rendah melalui kompleksasi antara logam dan gugus fungsi. Selain itu, dampak sifat biochar pada penyerapan logam bergantung pada logam, karena logam yang berbeda diserap melalui mekanisme yang berbeda pula.

II.6.2 Mekanisme Penyerapan Logam Berat Timbal (Pb) oleh Biochar

Mekanisme yang mengatur penyerapan logam dari air oleh biochar terdiri atas kompleksasi logam dengan gugus fungsi dan domain kaya elektron pada struktur aromatik biochar, pertukaran kation antara logam dan proton atau logam alkali pada permukaan biochar, presipitasi atau pengendapan logam untuk membentuk senyawa yang tidak larut, interaksi elektrostatik antara logam dan permukaan biochar, dan reduksi kimia. Namun, peran masing-masing

mekanisme dan kapasitas penyerapan untuk setiap logam sangat bervariasi bergantung pada sifat biochar dan logam target (Li *et al.*, 2017).

Menurut Wang *et al.* (2022), mekanisme penyerapan timbal (Pb) oleh biochar antara lain sebagai berikut :

1. Presipitasi (Pengendapan)

Sejumlah besar penelitian telah menunjukkan bahwa presipitasi adalah salah satu mekanisme penghilangan timbal (Pb). Permukaan biochar memiliki partikel Pb yang melimpah, yang membuktikan bahwa pengendapan merupakan mekanisme penghilangan Pb. Kapasitas penyisihan yang tinggi terutama disebabkan oleh pembentukan presipitasi mineral karbonat. Mineral karbonat (CO_3^{2-}) yang terdapat pada biochar berperan penting dalam mendorong pengendapan Pb. Fosfat pada permukaan biochar juga berperan penting dalam mendorong pengendapan Pb. Pengendapan Pb fosfat merupakan mekanisme penting bagi biochar untuk menyerap Pb(II). Selain itu, pH merupakan faktor penting yang mempengaruhi pengendapan ion Pb. Presipitasi $\text{Pb}(\text{OH})_2$ terbentuk pada $\text{pH} > 6,0$ karena terdapat struktur lokal dengan alkalinitas tinggi pada permukaan biochar. Peran presipitasi mineral meningkat secara signifikan dengan peningkatan suhu pirolisis.

2. Kompleksasi Permukaan

Kompleksasi adalah proses dimana elektron berinteraksi dengan donor dan akseptor untuk membentuk berbagai kompleks. Kompleksasi berperan penting dalam adsorpsi Pb oleh biochar. Kandungan dan jenis gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan biochar sangat berhubungan dengan kapasitas adsorpsi. Analisis karakterisasi seperti spektroskopi fotoelektron

sinar-X dan difraksi sinar-X menunjukkan bahwa mekanisme penghilangan Pb oleh biochar merupakan kompleksasi kimia antara Pb dan gugus fungsi yang mengandung oksigen. Gugus fungsi O ikatan tunggal mungkin berperan dominan karena ikatan tunggal memiliki penurunan yang signifikan dalam kekuatan gugus fungsi –OH/CO setelah adsorpsi Pb. Dibandingkan dengan gugus karboksil, gugus hidroksil memiliki energi ikat yang lebih kecil dan kemampuan pengkompleksasian logam yang lebih kuat. Kompleksasi sangat dipengaruhi oleh suhu preparasi biochar dan peran kompleksasi permukaan menurun secara signifikan dengan peningkatan suhu pirolisis.

3. Pertukaran Ion

Pertukaran ion adalah efek atau fenomena pertukaran ion dalam larutan dengan ion pada penukar ion tertentu. Pertukaran ini menggunakan pertukaran ion dalam penukar ion padat dengan ion dalam larutan encer untuk menghilangkan ion tertentu dalam larutan. Pertukaran ion juga merupakan salah satu mekanisme penghilangan Pb, terutama melalui pertukaran ion antara kation pada gugus fungsi yang mengandung oksigen dan ion Pb. Kapasitas pertukaran kation merupakan indikator penting dari efek penyisihan Pb ketika pertukaran ion dominan. Gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan biochar merupakan faktor yang mempengaruhi pertukaran ion. Selain itu, mekanisme pertukaran ion sering dipengaruhi oleh jumlah struktur asam pada permukaan biochar. Pertukaran ion sangat dipengaruhi oleh suhu pirolisis biochar.

4. Interaksi Elektrostatik

Interaksi elektrostatik terjadi antara ion Pb bermuatan positif dan gugus bermuatan negatif pada biochar, terutama gugus fungsi yang mengandung

oksigen. Kepadatan muatan pada permukaan biochar menarik ion dengan muatan berlawanan dan menolak ion dengan muatan yang sama. Pb dapat bergabung dengan $-\text{COOH}$ dan $-\text{OH}$, atom oksigen amida dan amino N pada biochar dengan interaksi elektrostatik. Nilai potensial zeta merupakan indikator yang penting untuk mengeksplorasi mekanisme penghilangan gaya tarik elektrostatik. Keelektronegatifan yang tinggi dari permukaan biochar menyebabkan perpindahan ion Pb ke biochar.

5. Ikatan Kimia

Unsur-unsur pada biochar dapat membentuk ikatan kimia dengan Pb dalam larutan berair untuk mencapai tujuan menghilangkan Pb. Mekanisme penghilangan Pb pada biochar melibatkan adsorpsi ikatan kimia. Jenis utama ikatan kimia adalah interaksi $\text{Pb(II)}-\pi$ dan interaksi $\pi-\pi$. Interaksi $\pi-\pi$ berperan dalam adsorpsi Pb oleh biochar. Interaksi $\pi-\pi$ menunjukkan kombinasi ion Pb dan $\text{C}=\text{C}$. Pergeseran $\text{C}=\text{C}$ dan perubahan pita setelah adsorpsi ion Pb menunjukkan bahwa efek $\pi-\pi$ memainkan peran penting. Oleh karena itu, pendalaman derajat grafitisasi biochar mendukung adsorpsi logam berat Pb. Selain itu, kapasitas adsorpsi konsisten dengan derajat grafitisasi dari biochar karena biochar dengan grafit tinggi dapat memberikan sejumlah besar donor π .

6. Adsorpsi Fisik

Adsorpsi fisik ditentukan oleh struktur pori spesifik dan luas permukaan. Adsorpsi fisik merupakan proses reversibel. Interaksi antara biochar dan Pb dapat dicapai melalui gaya van der Waals yang lemah. Selain itu, pengisian pori berperan penting dalam menghilangkan Pb. Permukaan biochar mengandung

partikel kristal unsur Pb, sehingga biochar dapat mengadsorpsi Pb melalui adsorpsi fisik.

II.6.3 Karbon Aktif Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa kebanyakan hanya dianggap sebagai limbah industri pengolahan kelapa. Ketersediaannya yang melimpah dianggap sebagai masalah bagi lingkungan. Padahal tempurung kelapa ini masih dapat diolah menjadi produk yang mempunyai nilai ekonomis tinggi yaitu sebagai karbon aktif atau arang aktif (Verayana *et al.*, 2018) seperti yang terlihat pada Gambar 1.



(a) (b)
Gambar 1. Tempurung kelapa (a) (Subagya dan Eskak, 2021) dan biochar tempurung kelapa (b) (Basri dan Azis, 2011)

Karbon aktif adalah karbon (arang) yang diberi perlakuan khusus, sehingga memiliki luas permukaan pori yang sangat besar berkisar 300-2.000 m²/g dan mengandung karbon sebanyak 85-95%. Peningkatan luas permukaan inilah yang menyebabkan karbon aktif memiliki kemampuan besar dalam penyerapan logam di dalam larutan. Karbon aktif dapat mengadsorpsi gas dan senyawa kimia tertentu atau sifat adsorpsinya selektif, tergantung pada besar atau volume pori-pori dan luas permukaan. Daya serap karbon aktif sangat besar, yaitu sebesar 25-100% terhadap berat karbon aktif (Irawan *et al.*, 2016).

Pada dasarnya, karbon aktif dapat dibuat dari bahan-bahan yang mengandung karbon. Bahan baku yang berasal dari hewan, tumbuh-tumbuhan, limbah ataupun mineral yang mengandung karbon dapat dibuat menjadi karbon aktif (Irawan *et al.*, 2016). Limbah pertanian yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif adalah limbah pertanian dengan rasio C/N yang tinggi (>20). Tempurung kelapa mempunyai rasio C/N yang sangat tinggi yaitu 122 (Rifki *et al.*, 2022). Tempurung kelapa sangat cocok untuk dijadikan sebagai bahan baku dari karbon aktif karena memiliki kandungan selulosa, hemiselulosa dan lignin (Verayana *et al.*, 2018).

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi daya serap karbon aktif, yaitu sifat karbon aktif, sifat komponen yang diserapnya, sifat larutan, dan sistem kontak (Verayana *et al.*, 2018). Selain itu, daya serap karbon aktif ditentukan oleh luas permukaan partikel dan dapat menjadi lebih tinggi jika dilakukan aktivasi dengan menggunakan aktivator bahan-bahan kimia ataupun dengan pemanasan pada temperatur tinggi (Irawan *et al.*, 2016). Kemampuan karbon aktif untuk mengadsorpsi berbeda untuk masing-masing senyawa. Adsorpsi akan bertambah besar sesuai dengan bertambahnya ukuran molekul yang diserap dari struktur yang sama (Verayana *et al.*, 2018).

Kemampuan karbon aktif untuk mengadsorpsi komponen dengan berat molekul rendah diindikasikan oleh adanya bilangan iodin karbon aktif. Karbon aktif dengan kemampuan menyerap iodin tinggi berarti memiliki luas permukaan lebih besar dan memiliki struktur mikro dan mesoporous yang lebih besar pula. Sifat kimia dari karbon aktif mempengaruhi kualitas karbon aktif, yaitu kadar air dan zat mudah menguap (Irawan *et al.*, 2016). Karbon aktif yang telah diaktivasi dengan

menggunakan bahan-bahan kimia mengandung 5-15% air, 2-3% abu dan sisanya terdiri atas karbon, serta pori-pori yang terbuka, sehingga memiliki daya adsorpsi yang tinggi terhadap zat, warna dan bau (Ronny dan Alfajri, 2021).

Karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki bilangan iodin tertinggi dibandingkan yang lain, sehingga karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki kemampuan menyerap yang lebih baik. Selain itu, karbon aktif dari tempurung kelapa juga memiliki kekerasan tinggi dengan kerapatan tinggi, sehingga kondisi ini bisa diaplikasikan pada proses-proses dengan tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan karbon aktif dari bahan lainnya (Irawan *et al.*, 2016). Kelebihan karbon aktif tempurung kelapa adalah memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga pori-porinya lebih banyak yang berguna dalam meretensi unsur hara (Rahayu *et al.*, 2019).

II.6.4 Pembuatan Karbon Aktif Tempurung Kelapa

Pembuatan karbon aktif tempurung kelapa dilakukan dengan metode *Soil Pit* (galian lubang berbentuk kerucut) dengan lebar 1 meter lebih dengan kedalaman setengah meter dan dibasahi dengan air, di tengahnya diberikan lempengan besi agar sirkulasi udara bisa masuk ke dalam lubang tersebut, sehingga tempurung kelapa yang dibakar tidak menjadi abu. Proses pembakaran selesai ketika telah terbentuk arang (biochar) dengan warna hitam yang merata. Ketika biomassa tersebut sudah menjadi bara, kemudian disiram dengan air secukupnya, lalu dikeringanginkan di tempat yang tidak terkena sinar matahari langsung dan selanjutnya ditumbuk. Kelebihan dari metode ini adalah harganya lebih murah karena tidak menggunakan alat produksi dan proses produksi yang lebih cepat.

Adapun kekurangannya adalah persentase yang dihasilkan lebih rendah, emisi dan polutan yang dilepaskan juga cukup banyak dari asap yang keluar melalui ventilasi atau lempengan besi yang dipasang dan perbedaan bahan baku dapat mengakibatkan perbedaan karakteristik dari kandungan biochar yang dihasilkan (Prasetyo *et al.*, 2020; Rifki *et al.*, 2022). Adapun pembuatan karbon aktif tempurung kelapa dapat dilihat pada Gambar 2.



(a) (b) (c)
Gambar 2. Biochar tempurung kelapa (a), biochar tempurung kelapa yang telah dihaluskan (b), biochar tempurung kelapa yang telah diaktivasi (c)

Karbon aktif diperoleh dari proses aktivasi karbon. Ada dua cara untuk mengaktivasi karbon yaitu secara kimia dan fisika (Jamilatun *et al.*, 2021). Proses aktivasi kimia merupakan proses pengaktifan karbon tempurung kelapa dengan menambahkan zat kimia tertentu pada sampel agar mengurangi kandungan air yang masih tertinggal pada permukaan karbon, sehingga pori-porinya lebih terbuka dan dapat meningkatkan daya serapnya (Verayana *et al.*, 2018). Langkah aktivasi secara kimia yakni bahan baku berupa karbon tempurung kelapa terlebih dahulu diperkecil ukurannya, kemudian direndam di dalam bahan kimia. Larutan untuk aktivasi biasanya berupa asam seperti asam klorida (HCl) dan asam sulfat (H_2SO_4) atau basa seperti natrium hidroksida (NaOH) dan garam seperti natrium klorida (NaCl).

Karbon tempurung kelapa direndam dalam larutan aktivator selama \pm 24 jam. Setelah proses perendaman, kemudian ditiriskan dan dicuci hingga mencapai pH netral dan selama 1-2 jam dipanaskan pada suhu 600-900°C. Larutan aktivator asam sulfat memiliki keunggulan dibandingkan larutan aktivator asam lainnya seperti memiliki sifat *dehydrate agent*, memiliki banyak situs aktif, pori-pori karbon/arang dapat dibuka/diperluas menggunakan asam sulfat secara cepat dengan cara membenturkan beberapa partikel berupa oksida-oksida logam (magnesium, besi, aluminium, dan kalsium) (Jamilatun *et al.*, 2021).

Langkah aktivasi secara fisika yakni karbon tempurung kelapa terlebih dahulu diperkecil ukurannya kemudian disaring. Selanjutnya adalah proses yang paling penting dalam pembentukan karbon aktif, yaitu proses *burning* di dalam *furnace* dengan menggunakan temperatur 1000°C dan uap yang dialirkan. Proses aktivasi secara fisika menggunakan media aliran gas sebagai proses karbonisasi untuk aktivasi seperti uap air dan CO₂ (Jamilatun *et al.*, 2021).