

TESIS

PENGOLAHAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN VARIASI MEDIA DAN WAKTU DETENSI DALAM *CONSTRUCTED WETLANDS* TANAMAN MANGROVE *RHIZOPHORA* SP.

*Acid Mine Drainage Treatment with Media
and Detention Time Variations in Constructed
Wetlands Mangrove Plants Rhizophora sp.*

**AISYANANG DENG NGAI
D092221005**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



PENGAJUAN TESIS

PENGOLAHAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN VARIASI MEDIA DAN WAKTU DETENSI DALAM *CONSTRUCTED WETLANDS* TANAMAN MANGROVE *RHIZOPHORA* SP.

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Lingkungan

Disusun dan diajukan oleh

**AISYANANG DENG NGAI
D092221005**



Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



TESIS

PENGOLAHAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN VARIASI MEDIA DAN WAKTU DETENSI DALAM *CONSTRUCTED WETLANDS* TANAMAN MANGROVE *RHIZOPHORA* SP.

AISYANANG DENG NGAI
D092221005

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka
penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 18 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc.
NIP. 194306122018016000

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.
NIP. 197506232015042001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., AER
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Lingkungan



Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.
NIP. 197506232015042001



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Aisyanang Deng Ngai

Nomor mahasiswa : D092221005

Program studi : Teknik Lingkungan

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Pengolahan Air Asam Tambang dengan Variasi Media dan Waktu Detensi dalam *Constructed Wetlands* Tanaman Mangrove *Rhizophora* sp.” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc dan Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal (*Ecological Engineering & Environmental Technology*, Volume 25, Halaman 246 - 261, dan DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/189817>) sebagai artikel dengan judul “Acid Mine Drainage Treatment with Organic Waste in Constructed Wetlands-Effluent Recirculation”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 17 Juli 2024

Yang menyatakan



Aisyanang Deng Ngai



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. atas segala berkah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan menyusun tesis yang berjudul Pengolahan Air Asam Tambang dengan Variasi Media dan Waktu Detensi dalam *Constructed Wetlands* Tanaman Mangrove *Rhizophora* sp. sebagai salah satu perwujudan Tri Darma Perguruan Tinggi serta syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Magister Teknik di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Gagasan utama pengolahan air asam tambang dengan *constructed wetlands* adalah ancaman kerusakan lingkungan akibat air asam tambang dari industri pertambangan sehingga dengan penelitian ini dapat menjadi sumber informasi dan edukasi khalayak ramai terutama industri pertambangan di Indonesia dan penelitian-penelitian lanjutan. Penelitian ini harus terus dikembangkan dalam rangka mewujudkan industri hijau.

Setelah berakhirnya penelitian ini, melalui halaman ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua terkasih Papa Marsud dan Almh. Mama Wiwik Peregowati. Atas dukungan dan doa yang mereka panjatkan dengan penuh keikhlasan, penulis dapat sampai dititik ini, walaupun sekarang mama tidak ada disisi penulis, namun doa semasa hidupnya yang menembus langit-lah yang membuat penulis mendapatkan segala bentuk kemudahan dalam kehidupan ini. Semoga penulis dapat menjadi apa yang mereka harapkan. Tidak lupa juga kepada kedua Saudara penulis Arizky Gladhyansyah dan sabrina Aprilianti serta Kakak Ipar Lia Isnawati dan Keponakan Arsyila Nafasya Rizky yang selalu memberi semangat kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini dengan cepat.

Bukan hal mudah untuk dapat melaksanakan penelitian ini sehingga pengimplementasiannya dapat menjadi solusi penanganan limbah air asam tambang. Berkat bimbingan, arahan, dan motivasi berbagai pihak, maka penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan tesis ini dapat disusun sebagaimana kaidah yang dipersyaratkan, serta segala bentuk bantuan, dukungan, dan doa dari pihak selama menjalani perkuliahan sampai penelitian, sehingga untuk itu juga menyampaikan terima kasih kepada:



1. Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc. sebagai pembimbing utama.
2. Dr. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T. sebagai pembimbing pendamping.
3. Dr. Ir. Achmad Zubair, M.Sc., Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., dan Dr. Eng. Ir. Asiyanthi T. Lando, S.T., M.T. sebagai tim dosen penguji
4. Rektor Universitas Hasanuddin Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran ramli, S.T., M.T., serta para Ibu/bapak dosen, staff, dan karyawan Departemen Teknik Lingkungan yang telah membimbing, memfasilitasi, dan membantu dalam menempuh pendidikan program Magister.
5. Pimpinan, staff, dan karyawan PT. Bukit Asam, terkhusus Vice President Environment and Mine Service Bapak Amar Rudin, dan Environmental SPV. Bapak Muhammad Iqbal, serta Bapak Muhammad Emir Habibie yang telah mengizinkan, memfasilitasi, dan membimbing pelaksanaan penelitian di PT. Bukit Asam.
6. Karyawan PT. Arica, Kak Sofyan, Kak Fikri, Kak Usro, Kak Fiki, Pak Henra, Pak Pak Ical, Pak Herman, Pak Apri dkk. yang selalu membantu pelaksanaan penelitian dan dengan tulus memberikan kasih dan perhatiannya kepada Penulis selama di Tanjung Enim. Mereka sudah seperti keluarga bagi Penulis.
7. Kak Eunike yang selalu memberi makanan kepada penulis selama ngekost di Tanjung Enim.
8. Teman-teman dari ITERA dan UNDIP terkhusus Ajeng, Putri, Nadhil, Chyndy, dan Hanum. Terima kasih telah membuat hari-hari penulis selama di Tanjung Enim menjadi lebih berkesan, mulai dari berangkat pagi bareng naik bus PTBA, masak-masak, makan, belajar, ghibah, dan jalan-jalan.
9. Teman seperjuangan penelitian Air Asam Tambang Andi Sulfahri, S.T. Terima kasih atas kerja sama dan bantuan selama menjalani penelitian.
10. Sahabat penulis dikampus Gowa Uswatun Khairiyah, S.T., Meliana Amarna, S.T., Ahmad Amiruddin, S.T., Miftahul Arifin Mahzud, S.T. dan Andi Muhammad Riswanda, S.T., Terima kasih telah menjadi saudara tak



sedarah yang sangat baik bagi penulis dan membuat masa-masa perkuliahan S2 menjadi lebih seru dan mudah.

11. Sahabat penulis dari S1 sampai S2, Siti Aras Ainun Basri, S.Si. Terima kasih sudah menjadi sahabat yang baik, yang selalu ada, membantu, dan menemani selama ini.

12. 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.

“Last but not least, i wanna thank me for believing in me, i wanna thank me for doing all this hard work, i wanna thank me for having no days off, i wanna thank me for never quitting, i wanna thank me for always being a giver and tryna give more than i receive, i wanna thank me for tryna do more right than wrong, i wanna thank me for just being me at all times.”

Penulis,



Aisyanang Deng Ngai



ABSTRAK

AISYANANG DENG NGAI. Pengolahan Air Asam Tambang dengan Variasi Media dan Waktu Detensi dalam *Constructed Wetlands* Tanaman Mangrove *Rhizophora* sp. (dibimbing oleh **Mary Selintung, Roslinda Ibrahim**)

Vertical subsurface flow constructed wetland (VSSF-CW) dievaluasi untuk menetralkan air asam tambang (AAT) menggunakan media organik dan ditanami mangrove. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kemampuan reaktor CW yang diberi variasi media dan waktu detensi dalam pengolahan AAT. Untuk mencapai tujuan utama penelitian ini, langkah-langkah yang dilakukan adalah menganalisis karakteristik AAT di lokasi penelitian, menganalisis jenis dan komposisi media, menentukan dimensi reaktor berdasarkan waktu detensi, dan menghitung efisiensi penyisihan. Untuk mengimplementasikannya, dilakukan aklimatisasi tanaman, pemilihan media organik, karakterisasi awal sampel, perakitan dan pengoperasian sistem. Hasil penelitian menunjukkan CW dalam penelitian ini mampu secara maksimal meningkatkan pH air asam tambang dari 3,32 menjadi 4,25-7,34. Reaktor tandan kosong kelapa sawit waktu detensi 12 hari (M2T1) mampu meningkatkan pH tertinggi. Selain itu, juga mampu menyisihkan TSS; Fe; Mn dengan efisiensi penyisihan masing-masing yaitu, 78,15% - 97,52%; 42,65% - 94,62%; 41,16% - 95,97%. Reaktor limbah daun kayu putih waktu detensi 12 hari (M1T1) mampu menyisihkan TSS, Fe, dan Mn terbesar. Jenis media organik dan waktu detensi berpengaruh secara signifikan dalam penyisihan pH, TSS, Fe, dan Mn air asam tambang. Logam Fe dan Mn pada setiap CW sebagian besar terakumulasi dalam bahan organik dan tanaman mangrove *Rhizophora* sp., serta terdapat juga logam yang tidak terdeteksi akibat dari adanya reaksi kimiawi dan aktivitas biologis mikroorganisme, sehingga menyisakan logam yang terdistribusi pada sedimen dan air.

Kata Kunci: limbah daun kayu putih (LDKP), tandan kosong kelapa sawit (TKKS), waktu detensi, *Rhizophora* sp, FABA bricks



ABSTRACT

AISYANANG DENG NGAI. Acid Mine Drainage Treatment with Variation of Media and Detention Time in *Constructed Wetlands* Mangrove Plants *Rhizophora* sp. (supervised by **Mary Selintung, Roslinda Ibrahim**)

Vertical subsurface flow constructed wetland (VSSF-CW) was evaluated to neutralise acid mine drainage (AMD) using organic media and planted with mangroves. The main objective of this study was to analyse the ability of CW reactors given variations in media and detention time in treating AMD. To achieve the main objective of this research, the steps taken were to analyse the characteristics of AAT at the research site, analyse the type and composition of media, determine the reactor dimensions based on detention time, and calculate the removal efficiency. To implement it, plant acclimatisation, organic media selection, initial sample characterisation, system assembly and operation were conducted. The results showed that the CW in this study was able to maximally increase the pH of acid mine drainage from 3.32 to 4.25-7.34. The 12-day detention time palm empty fruit bunch reactor (M2T1) was able to increase the pH the highest. In addition, it was also able to remove TSS; Fe; Mn with removal efficiency of 78.15% - 97.52%; 42.65% - 94.62%; 41.16% - 95.97%, respectively. The 12-day detention time eucalyptus leaf waste reactor (M1T1) was able to remove the largest TSS, Fe, and Mn. The type of organic media and detention time significantly influenced the removal of pH, TSS, Fe, and Mn of acid mine drainage. The Fe and Mn metals in each CW were mostly accumulated in organic matter and *Rhizophora* sp. mangrove plants, and there were also undetectable metals due to chemical reactions and biological activities of microorganisms, leaving metals distributed in sediments and water.

Keywords: eucalyptus leaf waste (ELW), oil palm empty fruit bunches (EFB), detention time, *Rhizophora* sp., FABA bricks



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GRAFIK	xv
DAFTAR DIAGRAM	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Pencemaran Lingkungan.....	8
2.1.1 Sumber-Sumber Bahan Pencemar	9
2.1.2 Pencemaran Akibat Kegiatan Penambangan	10
2.2 Pertambangan Batu Bara PT. Bukit Asam Tbk	11
2.3 Air Asam Tambang (AAT).....	13
2.3.1 Tipe-Tipe Pembentukan AAT.....	14
2.3.2 Proses Pembentukan AAT	15
2.3.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kualitas AAT.....	17
2.3.4 Dampak AAT	18



2.3.5 Rekayasa Remediasi AAT	19
2.4 Bioremediasi AAT	26
2.4.1 Bakteri Pereduksi Sulfat.....	27
2.4.2 Tanaman.....	28
2.5 Bahan Organik	31
2.5.1 Limbah Organik	32
2.5.2 Sedimen <i>Wetlands</i>	34
2.6 <i>Fly Ash-Bottom Ash (FABA)</i>	34
2.7 Jenis - Jenis <i>Constructed Wetlands</i>	35
2.8 Kriteria Desain Lahan Basah Buatan	37
2.9 Standar Baku Mutu Limbah Pertambangan	38
2.10 Penelitian Terdahulu	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	52
3.1 Rancangan Penelitian	52
3.2 Matriks Penelitian	53
3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian	54
3.4 Alat dan Bahan.....	54
3.5 Populasi dan Sampel	55
3.6 Tahapan Pelaksanaan Penelitian	55
3.7 Teknik Pengumpulan Data.....	68
3.8 Teknik Analisis Data.....	68
3.9 Diagram Alir Penelitian	69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	71
4.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian	71
4.2 Karakteristik Air Asam Tambang di Lokasi Penelitian	72
4.3 Hasil <i>Screening</i> Media Organik.....	73
4.4 Hasil Karakterisasi Sampel	75
4.5 Hasil Pengolahan Air Asam Tambang.....	79
4.6 Efisiensi Penyisihan Kontaminan Air Asam Tambang Setelah Proses Resirkulasi.....	117
Pengaruh Variasi Media dan Waktu Detensi	119
Reduksi dan Akumulasi Logam Fe dan Mn dalam <i>Constructed</i>	



Wetlands.....	133
4.9 <i>Bioconcentration Factor</i> (BCF) dan <i>Translocation Factor</i> (TF)	
Tanaman Mangrove <i>Rhizophora</i> sp	145
4.10 Pengaruh Perlakuan terhadap Tanaman Mangrove <i>Rhizophora</i>	
sp	147
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	150
5.1 Kesimpulan	150
5.2 Saran.....	150
DAFTAR PUSTAKA.....	151
LAMPIRAN.....	165



DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kriteria desain <i>constructed wetlands limbah</i> tambang batu bara.....	37
2. Standar baku mutu limbah penambangan batu bara (air asam tambang).....	38
3. Standar baku mutu air sungai kelas I	39
4. Penelitian terdahulu.....	40
5. Matriks penelitian.....	53
6. Kriteria desain reaktor dalam penelitian	56
7. Ukuran reaktor	57
8. Metode pengujian sampel AAT	64
9. Karakteristik air asam tambang di BB 07 PT. Bukit Asam	72
10. Hasil karakterisasi sedimen.....	75
11. Hasil karakterisasi sampel organik.....	77
12. Karakterisasi awal tanaman mangrove <i>Rhizophora</i> sp	78
13. Hasil Analisis pH	79
14. Hasil Analisis TSS	90
15. Hasil Analisis Fe	99
16. Hasil Analisis Mn.....	107
17. <i>Effect size</i>	118
18. Pengaruh variasi media dan waktu detensi terhadap pH.....	119
19. Pengaruh variasi media dan waktu detensi terhadap TSS.....	122
20. Pengaruh variasi media dan waktu detensi terhadap Fe.....	125
21. Pengaruh variasi media dan waktu detensi terhadap Mn	127
22. Reduksi logam Fe dalam AAT.....	131
23. Reduksi logam Fe dalam sedimen.....	132
24. Akumulasi logam Fe dalam tanaman.....	132
25. Akumulasi logam Fe dalam bahan organik.....	133
26. Logam Fe yang tidak terdeteksi	134
27. Reduksi logam Mn dalam AAT	137
28. Reduksi logam Mn dalam sedimen	138
29. Akumulasi logam Mn dalam tanaman	138



30. Akumulasi logam Mn dalam bahan organik	139
31. Logam Mn yang tidak terdeteksi.....	140
32. Nilai BCF mangrove <i>Rhizophora</i> sp.....	143
33. Nilai TF mangrove <i>Rhizophora</i> sp.....	143
34. Pengamatan kondisi tanaman mangrove <i>Rhizophora</i> sp.....	147



DAFTAR GRAFIK

Grafik	Halaman
1. Profil perubahan pH AAT dalam <i>outlet</i> (setiap melewati reaktor).....	81
2. Profil perubahan pH AAT dalam <i>inlet</i> selama resirkulasi	83
3. Profil perubahan kadar TSS AAT dalam <i>outlet</i> (setiap melewati reaktor).....	92
4. Profil perubahan kadar TSS AAT dalam <i>inlet</i> selama resirkulasi	94
5. Profil perubahan kadar Fe AAT dalam <i>outlet</i> (setiap melewati reaktor).....	101
6. Profil perubahan kadar Fe AAT dalam <i>inlet</i> selama resirkulasi	104
7. Profil perubahan kadar Mn AAT dalam <i>outlet</i> (setiap melewati reaktor).....	109
8. Profil perubahan kadar Mn AAT dalam <i>inlet</i> selama resirkulasi.....	112



DAFTAR DIAGRAM

Diagram	Halaman
1. Hasil screening bahan organik	74
2. Efisiensi penyisihan kontaminan AAT	117
3. Persentase akumulasi dan distribusi logam Fe dalam setiap <i>constructed wetlands</i>	137
4. Persentase akumulasi dan distribusi logam Mn dalam setiap <i>constructed wetlands</i>	143



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Perubahan bentang alam akibat penambangan	11
2. Kenampakan mineral pirit hasil uji mikroskopik optik pada conto batu bara.	12
3. Ilustrasi polusi akibat AAT	13
4. Proses pembentukan AAT.....	16
5. Mekanisme dasar oksidasi mineral <i>pyrit</i> (reaksi pembentukan AAT)	16
6. <i>Yellow boy</i> pada hilir sumber AAT	17
7. <i>Open limestone channel</i> / (OLC)	22
8. <i>Anoxic limestone drains</i> / ALD	23
9. Lahan basah aerobik.....	24
10. Lahan basah anaerobik	25
11. <i>Vertical flow system</i> atau SAPS	26
12. Mangrove <i>Rhizophora mucronate</i>	29
13. Mekanisme akumulasi logam berat dalam mangrove	30
14. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS)	33
15. Limbah daun kayu putih (LDKP)	34
16. <i>Fly ash-bottom ash</i>	35
17. Penampang melintang lahan basah buatan.....	38
18. Peta lokasi pengambilan AAT	54
19. Desain reaktor CW tampak samping	58
20. Desain komponen dalam reaktor CW tampak samping	58
21. Tanaman mangrove pada proses aklimatisasi	59
22. Reaktor <i>constructed wetlands</i> dalam penelitian	61
23. Bagan alir penelitian	69
24. Inlet dan kolam pengendapan lumpur BB 07 PT. Bukit Asam.....	71
25. Reduksi sulfat dalam BPS	87
26. Tanaman mangrove <i>Rhizophora</i> sp. setelah penelitian.....	148



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Pelaksanaan penelitian	166
2. Kriteria penilaian sifat-sifat tanah	170
3. Hasil uji SPSS	171
4. Hasil analisis laboratorium.....	174



DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

<i>Singkatan/Symbol</i>	<i>Arti/Keterangan</i>
AAT	Air asam tambang
BPS	Bakteri pereduksi sulfat
CW	<i>Constructed wetlands</i>
FABA	<i>Fly ash-bottom ash</i>
TKKS	Tandan kosong kelapa sawit
LDKP	Limbah daun kayu putih
pH	<i>Potential hydrogen</i>
TSS	<i>Total suspended solids</i>
Mn	Mangan
Fe	<i>Ferrum</i> (besi)
TD	Waktu detensi
HLR	<i>Hydraulic loading rate</i>
BCF	<i>Bioconcentration factor</i>
TF	<i>Translocation factor</i>
RE	Efisiensi penyisihan
Q	Debit
As	Luas permukaan
V	Volume
L	Liter
mL	Mili liter
Cm	<i>Centimeter</i>
M	Meter
C	Kadar yang didapatkan dari hasil pengukuran
FP	Faktor pengenceran



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah salah satu negara yang dikaruniai sumber daya alam yang sangat melimpah. Salah satu sumber daya alam tersebut yaitu sumber daya mineral dan batu bara yang berada pada sektor pertambangan (Suseno, 2019). Perkembangan yang pesat dalam dunia industri sering menjadi penyebab dari timbulnya pencemaran lingkungan yang bila tidak tertangani dengan benar maka akan memberikan dampak yang buruk. Pencemaran yang merusak keseimbangan lingkungan hidup biasanya disebabkan karena adanya limbah-limbah yang memiliki daya toksitas yang tinggi (beracun). Limbah-limbah beracun tersebut umumnya berasal dari limbah kimia (Fahrudin, 2018).

Air asam tambang atau *acid metalliferous drainase* adalah air limbah yang dihasilkan dari kegiatan penambangan (Dhir, 2018). Menurut Du *et al.* (2022); Dhir (2018); Irawan dkk. (2016) dalam Busyairi dkk. (2019) *acid mine drainage* (AMD) atau air asam tambang (AAT) merupakan isu global dan menimbulkan dampak lingkungan yang berbahaya. AAT dianggap sebagai bahan polutan karena memiliki tingkat keasaman yang tinggi ($\text{pH} < 4$), mengandung konsentrasi metaloid atau ion logam beracun (Fe, Zn, Cd, Al, Cu, Pb, dsb) yang tinggi, mengandung anion terlarut (sulfat, nitrat, klorida, arsenat, dll.), dan padatan tersuspensi (TSS) sehingga bersifat racun bagi tanaman, hewan, dan manusia.

Terbentuknya air asam tambang dianggap sebagai permasalahan yang sangat serius bagi perusahaan-perusahaan tambang yang berwawasan lingkungan. Hal ini disebabkan karena AAT sangat berpengaruh terhadap kondisi lingkungan sekitarnya yaitu dapat menimbulkan penurunan kualitas air tanah dan air permukaan (Rukmana dkk., 2017). Berdasarkan keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 tahun 2003 menyatakan bahwa setiap penanggung jawab usaha atau kegiatan pertambangan wajib melakukan pengolahan air limbah asal dari kegiatan penambangan sehingga mutu air limbah yang dibuang ke lingkungan tidak melampaui baku mutu air limbah. Demikian penelitian ini penting untuk dilakukan.



Siswoyo dkk. (2020); Suryadi dan Kusuma (2019) menyatakan bahwa beberapa permasalahan dalam sistem pengolahan air limbah yang sering terjadi adalah mahal biaya dan rumitnya operasional instalasi pengolahan air limbah. Sangat perlu dipikirkan dan diupayakan secara cermat pemilihan teknologi atau metode yang tepat dan ekonomis untuk mengolah limbah air asam yang selalu terbentuk secara terus menerus. Lebih lanjut Du *et al.* (2022) menyatakan bahwa pengolahan tradisional untuk air asam tambang telah banyak digunakan sejak lama. Namun demikian, beberapa keterbatasan seperti kemanjuran atau efisiensi rendah dan kontaminasi sekunder, telah menyebabkan metode tersebut digantikan oleh metode lain seperti pengolahan air asam tambang berbasis bio.

Berdasarkan keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2022 pasal 2 ayat 2 menyatakan bahwa dalam melakukan pengolahan air limbah, penanggung jawab usaha dan/atau kegiatan pertambangan dapat menerapkan standar teknologi pengolahan air limbah dengan cara lahan basah buatan. Lahan basah buatan (LBB) juga sering disebut sebagai *constructed wetlands*. Kivaisi (2001); Blanco *et al.* (2017) dalam jurnal Singh dan Chakraborty (2020) menyatakan bahwa *constructed wetlands system* menawarkan pilihan pengolahan pasif untuk berbagai jenis polutan dalam air limbah karena tidak membutuhkan energi serta tenaga dibandingkan dengan proses pengolahan kimia (pengolahan aktif) dan biologi konvensional lainnya, serta dapat beroperasi dengan persyaratan pemeliharaan yang minim.

Pendekatan bioteknologi dengan menggunakan potensi bakteri pereduksi sulfat (BPS) adalah salah satu cara yang digunakan dalam *passive treatment*. Bakteri pereduksi sulfat (BPS) dapat digunakan dalam bioremediasi air asam tambang. BPS dapat membuat akumulasi sulfat dalam air asam tambang menurun (Perala *et al.*, 2022). Fahrudin dkk. (2014) menyatakan bahwa bakteri pereduksi sulfat (BPS) dapat diisolasi dari substrat-substrat berlumpur seperti pada sedimen. Sedimen yang berkontak dengan AAT dapat mengakibatkan peningkatan pH dalam AAT, menurunkan kadar sulfat, dan meningkatkan pertumbuhan BPS.



ryatmana dkk. (2020) dalam jurnalnya menyatakan bahwa BPS hkan bahan organik (sumber karbon) dalam pertumbuhan dan nya yang dapat diperoleh dari substrat-substrat organik. Hal tersebut

dibuktikan dalam penelitiannya yang menunjukkan hasil bahwa, penambahan bahan organik dan BPS pada remediasi AAT menggunakan *constructed wetlands* berpengaruh nyata terhadap peningkatan nilai pH dalam AAT. Lebih lanjut Nielsen *et al.* (2019) memaparkan bahwa bakteri pereduksi sulfat atau *sulfate reduction bacteria* (SRB) membutuhkan sumber karbon sebagai donor elektron untuk mereduksi sulfat. Sumber karbon yang diperlukan bakteri pereduksi sulfat dapat berupa karbon organik kompleks dan karbon organik sederhana.

Moodley *et al.* (2017) dalam penelitiannya menyatakan bahwa banyak metode yang dapat digunakan untuk memulihkan AAT terbatas dalam penerapannya karena kinerja yang buruk, biaya tinggi, penggunaan bahan kimia berbahaya, penipisan sumber daya alam, dan menghasilkan limbah lebih lanjut. Sebagai akibat dari keterbatasan tersebut dan karena kebutuhan ini akan berlanjut, maka perlu dilakukan penggunaan bahan limbah atau produk sampingan dari industri lain untuk remediasi AAT. Chen *et al.* (2022) menyatakan bahwa limbah padat biomassa memiliki prospek yang baik sebagai sumber karbon untuk pengolahan air limbah secara biologis. Lebih lanjut Agustono dkk. (2017) menyatakan bahwa sampai saat ini produksi limbah dari hasil kegiatan pertanian dan agroindustri masih merupakan produk yang belum dimanfaatkan secara baik. Demikian diperlukan pemikiran untuk memanfaatkan limbah tersebut dalam proses pengolahan limbah lain, dalam hal ini adalah air asam tambang.

Limbah organik kegiatan agroindustri yang dapat dimanfaatkan dalam pengolahan air asam tambang adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang merupakan limbah industri pengolahan kelapa sawit. Hal tersebut terbukti dari penelitian yang dilakukan oleh Syamsiah dkk, (2022) yang memperoleh hasil bahwa pemberian tandan kosong kelapa sawit memberikan pengaruh sangat nyata terhadap kenaikan pH, dan penurunan kadar Fe serta Mn ATT. Selain TKKS, limbah organik lain yang dapat dimanfaatkan adalah limbah penyulingan daun kayu putih. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya penelitian yang dilakukan oleh Dewani (2015) yang menggunakan limbah segar daun kayu putih dan kompos daun putih. Hasil penelitiannya memperoleh hasil bahwa penggunaan limbah nampu meningkatkan pH, menurunkan kadar Fe, Mn dan TSS dalam air asam dibandingkan dengan perlakuan kontrol.



Limbah lain yang dapat dimanfaatkan dalam pengolahan air asam tambang adalah *fly ash bottom ash* (FABA). Insan dkk. (2019) menyatakan bahwa FABA merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara. Limbah ini sangat banyak dihasilkan sehingga dibutuhkan cara untuk mengurangi penumpukan FABA Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Saputra dkk. (2021) yang menggunakan tujuh komposisi FABA diperoleh hasil bahwa komposisi terbaik untuk pengolahan 400 mL AAT yang mempunyai pH 3,74 yaitu 2 gr FABA sehingga pH akan menjadi 7,24. Lebih lanjut Win *et al.* (2020) menyatakan bahwa pencampuran FABA dan bahan organik efektif dalam mencegah pembentukan air asam tambang dengan cara mengonsumsi oksigen dilapisan atas dan mengurangi konsentrasi logam terlarut. Kandungan alkalinitas dari kapur (CaO) dan dolomit yang terkandung dalam FABA akan menghasilkan ion hidroksida yang akan mengonsumsi keasaman dan meningkatkan pH.

Purwani (2010) dalam Suryatmana dkk. (2020) menyatakan bahwa optimalisasi kinerja *constructed wetlands* dalam remediasi AAT dapat ditingkatkan dengan pemanfaatan agen bioremediasi lainnya, yaitu tanaman. Tanaman dapat memobilisasi kontaminan, meningkatkan, serta memelihara kondisi lingkungan mikroba dengan menyuplai nutrisi bagi mikroba tersebut. Lebih lanjut Henny dkk. (2010) dalam Habibullah dkk. (2021) menyatakan bahwa peran tumbuhan dalam pengolahan lingkungan adalah untuk mengurangi, menurunkan, menghilangkan, atau melumpuhkan racun pada lingkungan, yang bertujuan untuk memulihkan suatu situs ke kondisi yang dapat digunakan kembali.

Mangrove telah diteliti secara luas sebagai tanaman yang mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat dalam jaringannya. Mangrove telah dimanfaatkan untuk mereduksi logam berat dilingkungan perairan. Mangrove *Rizhopora* memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menyerap logam berat seperti Hg, Mn, Zn, Cr, Cu, Cd, dan Pb (Wilda *et al.*, 2020). Selain itu Nualla-ong *et al.* (2020) menyatakan bahwa mangrove *Rhizophora mucronata* telah diteliti mampu toleran logam dan mampu mengakumulasi logam dalam jumlah besar di jaringan



ngolahan air asam tambang dengan lahan basah buatan yang

memanfaatkan bahan organik dan tanaman telah banyak dilakukan dewasa ini, namun terkadang masih memiliki efisiensi rendah dan waktu pengolahan yang relatif lama yang dapat disebabkan karena tidak memperhitungkan jenis dan komposisi media, serta perakitan dan pengoperasian sistem yang kurang tepat. Untuk dapat mengisi kesenjangan tersebut maka dilakukan penelitian ini yang mencoba mengembangkan metode pengolahan AAT yang lebih memperhitungkan jenis dan komposisi, serta perakitan dan pengoperasian sistem. Sistem ini mengkombinasikan potensi dari limbah organik, tanaman mangrove, FABA bricks, dan sedimen *wetland* yang secara alami mengandung BPS. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menjadi inovasi dalam pengolahan air asam tambang.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kinerja *constructed wetlands* dalam pengolahan air asam tambang?
2. Bagaimana pengaruh variasi jenis media organik dan waktu detensi dalam penyisihan pH, TSS, Fe, dan Mn air asam tambang?
3. Bagaimana akumulasi dan distribusi logam dalam *constructed wetlands*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kinerja *constructed wetlands* dalam pengolahan air asam tambang melalui perhitungan *removal efficiency*.
2. Menganalisis pengaruh variasi jenis media organik dan waktu detensi dalam penyisihan pH, TSS, Fe, dan Mn air asam tambang.
3. Menganalisis akumulasi dan distribusi logam dalam *constructed wetlands*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Peneliti



bagai bentuk kontribusi dalam menjalankan salah satu kewajiban Tri Perguruan Tinggi yaitu melakukan penelitian dan dapat meningkatkan *soft* n pengolahan limbah terkhusus limbah cair pertambangan batu bara.

2. Bagi Pelaku Usaha

Sebagai salah satu referensi bagi pelaku usaha pertambangan dalam pengolahan AAT dengan sistem pengolahan yang ramah lingkungan, efektif dan efisien. Khusus bagi PT. Bukit Asam Tbk dapat terjalin hubungan yang baik dengan pihak Universitas Hasanuddin terutama program studi Teknik Lingkungan sebagai salah satu instansi pendidikan bagi calon tenaga ahli dibidang teknik lingkungan yang sangat dibutuhkan oleh perusahaan industri yang berwawasan lingkungan.

3. Bagi Instansi Pendidikan

Memberikan kontribusi terhadap perkembangan ilmu rekayasa lingkungan, khususnya dalam bidang keilmuan sanitasi lingkungan dan bioremediasi, dapat menjadi alternatif pengolahan air limbah industri pertambangan dalam usaha pengelolaan lingkungan utamanya terhadap limbah air asam tambang, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan metode pengolahan air asam tambang terutama pada metode *passive treatment*.

4. Bagi Masyarakat

Memberikan pengetahuan kepada masyarakat yang bekerja dalam sektor pertanian dan perkebunan mengenai pemanfaatan limbah organik seperti daun kayu putih dan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan untuk mengolah air limbah khususnya limbah air asam tambang. Sehingga antar masyarakat dengan pemilik usaha atau kegiatan penambangan dapat bermitra.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk mengarahkan penelitian, maka diberikan batasan agar dapat lebih fokus dan terarah pada suatu batasan tertentu. Adapun batasan masalah dalam studi ini adalah:

1. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan menggunakan sampel utama berupa air asam tambang dan dilaksanakan dalam skala laboratorium di laboratorium PAB PT. Bukit Asam Tbk. dan laboratorium kualitas air Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.



pengambilan sampel air asam tambang dan sedimen *wetlands* dilakukan di inlet BB 07 Banko Barat PT. Bukit Asam Tbk, tandan kosong kelapa sawit dari PT. Bumi Sawindo Permai Mill, limbah daun kayu putih dari

pabrik penyulingan kayu putih, serta tanaman dan biomassa tanaman yang diperoleh dari pembibitan dan sekitaran area PT. Bukit Asam Tbk.

3. Model *prototype* pengolahan air limbah industri pertambangan batu bara menggunakan desain *constructed wetlands* skala mini.
4. Pengukuran efisiensi remediasi air asam tambang dalam penelitian ini dibatasi pada pengukuran besarnya penurunan kadar kontaminan dalam limbah tersebut pada variasi jenis media dan waktu detensi dalam reaktor. Pengujian akhir yaitu menganalisis kadar pencemar dalam air asam tambang yang telah melalui proses pengolahan meliputi pH, TSS (*total suspended solid*), Fe, dan Mn serta persebaran akumulasi logam dalam *constructed wetlands*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Lingkungan

Lingkungan merupakan suatu ruang bagi makhluk hidup untuk dapat saling berinteraksi demi kelangsungan hidupnya. Manusia merupakan komponen utama didalam lingkungan hidup (Siregar dan Nasution, 2020). Lingkungan hidup berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 17 tahun 2009 tentang pedoman penentuan daya dukung lingkungan hidup dalam penataan ruang wilayah adalah kesatuan ruang dengan semua benda, daya, keadaan, dan makhluk hidup, termasuk manusia dan perilakunya yang mempengaruhi kelangsungan perikehidupan dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lain. Menurut Siswanto (2015) dalam Sari (2018), lingkungan hidup terdiri dari air, lautan, udara, kekayaan alam yang ada dibumi.

Pencemaran lingkungan menurut Undang-Undang Republik Indonesia No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Bab I Pasal 1 Ayat 14 adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan. Sigit dkk. (2017) menyatakan bahwa, manusia secara ekologis merupakan bagian dari lingkungan hidup, sehingga tidak dapat terpisahkan. Lingkungan hidup bukan semata-mata hanya dianggap sebagai suatu sumberdaya yang hanya untuk dieksploitasi. Namun juga harus dianggap sebagai tempat hidup yang mensyaratkan adanya keserasian antara manusia dengan lingkungan hidupnya.

Menurut Dewata dan Danhas (2018), kondisi lingkungan berpengaruh negatif terhadap makhluk hidup itu sendiri disebabkan oleh manusia, sehingga dengan kata lain pencemaran lingkungan terjadi karena ulah manusia itu sendiri. Sumber bahan pencemar lingkungan beragam. Sumber bahan pencemar dapat berasal dari limbah industri, domestik (rumah tangga, pasar, rumah sakit dan perkantoran), aktivitas pertanian dan pasca panen. Jenis bahan polutan terdiri dari kimia (zat radio aktif, logam pupuk anorganik, pestisida, detergen dan jenis biologis (semua jenis mikroorganisme patogen) dan jenis fisik seperti kaleng, botol, plastik, dan karet).



Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UUPPLH) menyebutkan bahwa kualitas lingkungan hidup yang menurun telah mengancam lingkungan hidup dan kelangsungan kehidupan umat manusia serta makhluk hidup lainnya, sehingga perlu dilakukan perlindungan pengelolaan lingkungan hidup yang sungguh-sungguh dan konsisten oleh semua pemangku kepentingan, agar lingkungan jauh dari pencemaran yang dapat merusak tatanan lingkungan saat ini dan akan datang.

2.1.1 Sumber-Sumber Bahan Pencemar

Sumber-sumber bahan pencemar lingkungan dapat diklasifikasikan seperti sebagai berikut:

1. Limbah domestik

Limbah domestik merupakan limbah yang berasal dari usaha atau aktivitas permukiman, rumah makan, perniagaan, perkantoran, apartemen, dsb (Sulistia dan Septisya., 2019). Yudo (2010) dalam Pratama dkk. (2020) menyatakan bahwa, limbah domestik yang paling dominan dilingkungan umumnya berasal dari kotoran manusia dan ternak, selain itu dapat berasal dari penggunaan detergen, shampo, dan bahan kimia lainnya.

2. Limbah pertanian dan peternakan

Limbah pertanian adalah limbah atau bahan buangan yang berasal dari sektor pertanian seperti jerami tanaman, kotoran ternak, sabut, dan tempurung kelapa, dedak padi, dsb. Limbah pertanian dapat berwujud bahan buangan yang tidak terpakai dan bahan sisa dari proses pengolahan hasil-hasil tanaman pertanian (Irianto, 2015).

3. Limbah medis

Limbah medis merupakan sisa buangan akhir dari hasil kegiatan di fasilitas pelayanan kesehatan seperti pada rumah sakit. Limbah ini dapat berbentuk cair, padat, ataupun gas. Limbah medis termasuk dalam kategori limbah B3 padat yang meliputi limbah infeksius seperti jarum suntik, limbah dari obat-obatan dan bahan kimia serta limbah B3 lainnya yang berasal dari bahan patologis, radioaktif, sitotoksik, dan limbah logam (Adhani, 2018).



ah industri

nbah industri adalah limbah atau buangan akhir dari kegiatan industri, baik

karena proses secara langsung maupun tidak langsung. Limbah industri merupakan limbah yang terproduksi sebelum proses produksi atau bersamaan dengan jalannya proses produksi, dan atau setelah proses produksi. Limbah ini terdiri dari limbah cair, padat, gas, dan partikel, serta limbah B3 (Arief, 2016).

5. Limbah pertambangan

Kegiatan penambangan merupakan salah satu kegiatan penyumbang limbah dalam jumlah yang besar dan jika tidak dikelola dengan baik maka akan berpotensi dalam menimbulkan risiko pencemaran lingkungan. Limbah kegiatan penambangan dapat berupa limbah B3 dan non B3 dan dapat berwujud cair ataupun padat (Putri dkk., 2020).

2.1.2 Pencemaran Akibat Kegiatan Penambangan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki kekayaan alam yang melimpah yang tersebar diberbagai wilayah di Indonesia, salah satunya adalah kekayaan alam dari sumber daya sektor pertambangan (Hartana, 2017). Menurut Fatmawati dkk. (2017) aktifitas penambangan diibaratkan seperti uang logam yang memiliki dua sisi yang saling berlawanan. Kegiatan penambangan pada satu sisi merupakan sumber kemakmuran karena merupakan penyokong pendapatan negara dan penyedia lapangan pekerjaan dan disisi lain merupakan sumber kerusakan lingkungan yang sangat potensial karena kegiatan penambangan terbuka dapat mengubah iklim dan tanah secara total karena lapisan tanah diatas deposit bahan tambang disingkirkan. Hal tersebut mengakibatkan hilangnya vegetasi, sehingga secara langsung maupun tidak langsung kegiatan penambangan menyebabkan hilangnya fungsi hutan sebagai pengatur tata air, pengendalian erosi, banjir, penyerap karbon, pemasok oksigen dan pengatur suhu.

Permasalahan lingkungan akibat industri pertambangan khususnya dalam penambangan dan pemanfaatan batu bara pada kegiatan industri sangat perlu untuk diperhatikan karena dampak yang ditimbulkan dapat bersifat sangat merugikan (negatif) (Arif, 2014). Kegiatan penambangan batu bara dengan sistem tambang sangat berpotensi untuk menimbulkan kerusakan atau pencemaran lingkungan. Salah satu efek dari kegiatan penambangan batu bara adalah adanya limbah air asam tambang atau yang dikenal dengan singkatan AAT (Arifin dkk., 2018).



Afrianti dan Purwoko (2020), dalam penelitiannya melaporkan dampak kerusakan sumber daya alam akibat petambangan batu bara di Nagara Lunang kabupaten Pesisir Selatan Provinsi Sumatera Barat yaitu, menurunnya kualitas udara akibat kegiatan *landclearing* yang menyebabkan meningkatnya kandungan TSP, dan pada kegiatan pengolahan bara menyebabkan meningkatnya kandungan SO₂, NO₂, dan CO, selain itu juga menyebabkan peningkatan kebisingan akibat aktivitas kendaraan dilokasi tambang. Selain menyebabkan menurunnya kualitas udara, kegiatan penambangan juga menyebabkan menurunnya kualitas air permukaan. Hasil analisis air menunjukkan bahwa sungai di dekat lokasi penambangan wilayah studi telah tercemar dengan besi (Fe) yang melebihi baku mutu. Hasil lain yang dilaporkan dalam penelitiannya mengenai dampak kegiatan penambangan adalah hilangnya vegetasi hutan, flora dan fauna, serta lapisan tanah, sehingga menyebabkan terganggunya fungsi hidrologis, serapan karbon, pemasok oksigen, pengatur suhu lingkungan, dan keragaman jenis (*biodiversity*). Hilangnya vegetasi juga akan memberi dampak terhadap daerah aliran sungai di areal penambangan batu bara yaitu berkurangnya debit air, rusaknya bentang lahan sebagai *recharge area*, tingginya sedimentasi, menurunnya kualitas air sungai, dan infiltrasi. Berikut adalah salah satu dampak dari kegiatan penambangan yaitu terjadinya perubahan bentang alam.



Gambar 1 Perubahan bentang alam akibat penambangan
(Listiyani, 2017; Suryadi dan Kusuma, 2019)

2.2 Pertambangan Batu Bara PT. Bukit Asam Tbk.



PT. Bukit Asam Tbk adalah salah satu perusahaan pertambangan di Indonesia bergerak dalam bidang usaha pertambangan batu bara yang terletak di n Tanjung Enim, Kecamatan Lawang Kidul, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Sistem penambangan yang digunakan oleh Bukit Asam

adalah sistem penambangan terbuka dengan metode berupa *open pit*. Sistem penambangan *open pit* meliputi kegiatan pemberaian batuan dengan teknik pengeboran dan peledakan, diikuti dengan operasi penggalian, pemuatan, serta pengangkutan material ke Stockpile (Abdillah dkk., 2021).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Abdillah dkk. (2021) yang menganalisis seam batu bara dari Pit 1 Utara Penambangan Banko Barat PT. Bukit Asam dengan analisis XRF menunjukkan hasil bahwa seam batu bara tersebut mengandung SO_2 dan Fe. Reaksi antara SO_2 dan Fe akan membentuk mineral pirit. Lebih lanjut Widodo dkk. (2019), menjelaskan bahwa mineral pirit merupakan salah satu jenis mineral sulfida yang sangat sering terkandung di dalam batu bara. Keberadaan mineral pirit ini sangat berpotensi untuk menimbulkan masalah pada kegiatan penambangan dan pemanfaatan batu bara. Terkhusus pada kegiatan penambangan, mineral pirit berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan akibat eksistensi air asam tambang. Berikut adalah contoh gambar penampakan mikroskopis mineral pirit pada permukaan batubara.



Gambar 2 Kenampakan mineral pirit hasil uji mikroskop optik pada seam batu bara (Widodo dkk., 2019)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Gobel dkk. (2018) yang menganalisis kandungan air asam tambang (AAT) pada *inlet* KPL penambangan Banko PT. Bukit Asam yaitu pada KPL Galian Pit 1 Barat, menunjukkan hasil kandungan AAT-nya terdiri dari pH = 2,91; TSS = 18 mg/L; Fe = 12,17 mg/L; Mn = 7,72 mg/L dan pada KPL Temporary *Stockpile* Pit 3 Barat menunjukkan hasil kandungan AAT-nya terdiri dari pH = 3,17; TSS = 68,0 mg/L; Fe = 8,15 mg/L; Mn 3/L. Nilai pH, Fe, dan Mn dalam AAT dari kedua lokasi tersebut melebihi baku mutu air limbah penambangan batu bara.



2.3 Air Asam Tambang (AAT)

Air asam tambang (ATT) adalah air limbah yang terbentuk pada saat dan setelah eksploitasi batu bara dengan menggunakan sistem penambangan terbuka (Yunus dan Prihatini, 2018). AAT dapat berasal dari timbunan batuan sisa, timbunan bijih, fasilitas penyimpanan tailing dan bendungan tailing, bahan konstruksi (bahan konstruksi jalan raya dan tanggul) yang dibangun dengan bahan sulfida, lubang tambang, tambang bawah tanah, dan tanah dengan kandungan sulfat masam (Jones *et al.*, 2016). AAT memiliki karakteristik yaitu tingkat keasaman tinggi (pH rendah), kandungan besi yang tinggi bersama dengan logam lainnya, kandungan padatan terlarut yang tinggi, kandungan sulfat tinggi, dan bahan organik sangat rendah atau nihil (Patel *et al.*, 2018). Berikut adalah ilustrasi polusi akibat AAT. (A: AAT pada *effluents*; B: endapan mineral sekunder dari AAT di Maroko; C dan D: AAT dari Afrika Selatan; E: lindi sianida; F: endapan sulfida di Kanada; G: aliran AAT di Amerika Serikat; H: AAT dari penambangan emas di Afrika Selatan).



Gambar 3 Ilustrasi polusi akibat AAT (Kefeni *et al.*, 2017)

AAT memiliki nilai $\text{pH} < 4$ yang menyebabkan mudahnya kelarutan logam besi dan Mn (Yunus dan Prihatini, 2018). Tsukamoto dan Miller (1999) dalam



Dhir (2018) menyatakan bahwa AAT telah dianggap sebagai polutan yang menjadi perhatian serius karena sifatnya yang asam, mengandung ion logam beracun yang tinggi (Fe, Zn, Cd, Al, Cu, Pb), anion terlarut (sulfat, nitrat, klorida, arsenat, dll.), dan padatan tersuspensi. Konsentrasi sulfat berkisar dari 100 hingga 5000 mg L⁻¹

Air asam tambang terbentuk saat mineral-mineral sulfida tertentu ter-*exposed* dan berada dalam kondisi oksidasi. Mineral sulfida pembentuk air asam tambang dapat ditemukan di tambang batu bara (*acid mine drainage*) maupun tambang bijih (*acid rock drainage*) atau dikegiatan penggalian lain. Air asam tambang terbentuk melalui serangkaian reaksi kimia dan mikrobial yang kompleks yang dimulai ketika air bereaksi dengan mineral besi disulfida atau dikenal dengan mineral pirit (Polawan, 2017). Menurut Said (2014) dalam Fahrudin (2022), menyatakan bahwa mineral sulfida logam yang biasa dijumpai pada lokasi penambangan yaitu FeS (*pyrite*), FeS₂ (*marcasite*), Fe_xS_x (*pyrrhotite*), PbS (*galena*), Cu₂S (*chalcocite*), CuS (*covellite*), CuFeS₂ (*chalcopyrite*).

2.3.1 Tipe-Tipe Pembentukan AAT

Skousen dan Ziemkiewics (1996) dalam Polawan (2017) menjelaskan bahwa air tambang terbagi menjadi beberapa tipe pembentukan yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Air tambang tipe 1

Merupakan air tambang yang memiliki tingkat alkalinitas rendah, keasaman (*acidity*) tinggi yaitu dengan pH < 4,5 disertai dengan oksigen, dan mengandung beberapa jenis logam seperti Fe, Al, dan Mn. Sehingga air ini disebut air asam tambang

2. Air tambang tipe 2

Merupakan air tambang dengan jumlah padatan terlarut atau TDS (*total dissolve solid*) tinggi, mengandung kadar besi ferri dan Mn tinggi, tidak atau mengandung sedikit oksigen dan nilai pH > 6,0.

3. Air tambang tipe 3

Merupakan air tambang dengan nilai TDS sedang sampai tinggi, kandungan besi ferri dan Mn rendah sampai sedang, tidak atau sedikit mengandung oksigen, pH > 6, alkalinitas lebih besar daripada keasaman, sehingga bersifat basa. Oleh karena itu air ini biasa disebut *alkaline mine drainage*. Jika



teroksidasi, asam yang terbentuk dari reaksi hidrolisa dan presipitasi logam akan dinetralkan oleh alkalinitas dalam air tersebut.

4. Air tambang tipe 4

Merupakan air tambang yang dinetralkan, memiliki $\text{pH} > 6,0$ dan kandungan TDS yang tinggi. Hidroksida logam belum terendapkan. Pada saat melalui kolam pengendalam, padatan akan mengendap sehingga terbentuk air tipe 5.

5. Air tambang tipe 5

Merupakan air asam tambang yang telah dinetralkan dengan $\text{pH} > 6,0$ dan mengandung TDS yang tinggi. Setelah hidroksida logam mengendap di kolam pengendap, yang tertinggal di dalam air umumnya adalah Ca, Mg, bikarbonat, dan sulfat.

6. Air tambang tipe 6

Merupakan air tambang netral yang berasal dari tambang dengan kandungan sulfida yang sangat kecil dan kandungan karbonat yang rendah sampai sedang. Umumnya netral dan DHL rendah ($< 100\mu\text{S}/\text{mm}$), serta alkalinitas dan keasaman hampir seimbang.

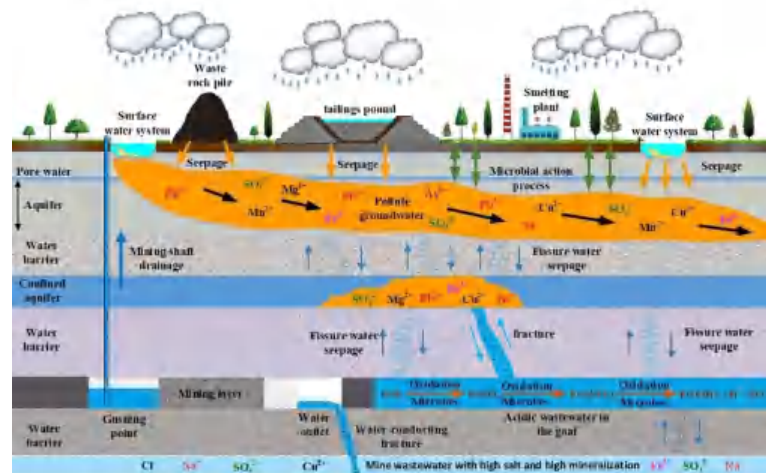
2.3.2 Proses Pembentukan AAT

Pembentukan air asam tambang (AAT) terjadi saat batuan penutup dan bagian batu bara yang memiliki kandungan mineral-mineral sulfida terutama mineral pirit (FeS_2) terekspos ke permukaan bumi, kemudian bereaksi dengan udara dan air, sehingga menyebabkan terjadinya oksidasi mineral sulfida tersebut dan menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4) yang sangat masam dan besi terlarut dengan konsentrasi tinggi. Tingkat kemasaman yang tinggi pada AAT ini akan menyebabkan larutnya logam-logam metaloid dalam air tersebut, termasuk logam berat yang ada disekitarnya (Munawar, 2017). Beberapa jenis mineral sulfida yang ada dalam proses pembentukan AAT yaitu, FeS_2 , CuS_2 , CuS , CuFeS_2 , MoS_2 , NiS , PbS , dan ZnS . Mineral pirit merupakan mineral sulfida yang umum terkandung pada lokasi penambangan, terutama pada kawasan tambang batu bara (Wahyudin dkk., 2018). Berikut adalah proses pembentukan AAT akibat batuan

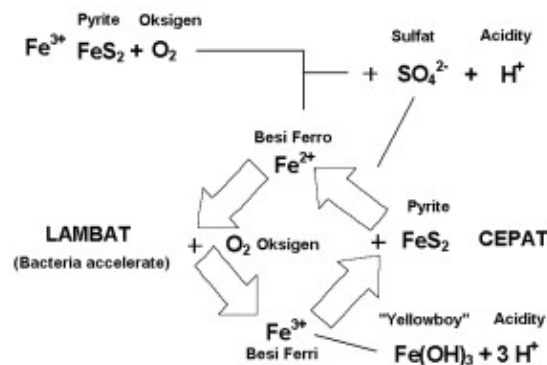
dan bagian batu bara yang memiliki kandungan mineral-mineral sulfida ke permukaan bumi dan bereaksi dengan udara dan air (**Gambar 4**) dan bentuknya AAT dinyatakan dengan persamaan reaksi seperti yang tertera



pada (Gambar 5) dan persamaan 1-3 (Fahrudin, 2018):

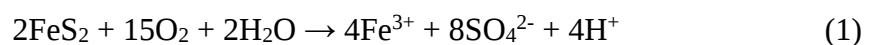


Gambar 4 Proses pembentukan AAT (Chen *et al.*, 2021)



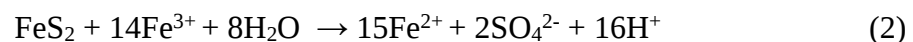
Gambar 5 Mekanisme dasar oksidasi mineral *pyrit* (reaksi pembentukan AAT) Stumm dan Morgan (1996) dalam Said (2014)

1. Proses pertama yang terjadi adalah oksidasi dari mineral sulfida. Proses oksidasi ini dapat terjadi karena adanya udara, air, dan bakteri. Reaksi yang terbentuk adalah:



Akibat dari adanya reaksi ini adalah lingkungan menjadi sedikit asam dengan indikator pH menurun sehingga memicu perkembangan bakteri *Thiobacillus ferrooxidans*. Bakteri tersebut memperoleh sumber energi dari senyawa anorganik yang mengandung S dan Fe, akibatnya terjadi oksidasi pirit.

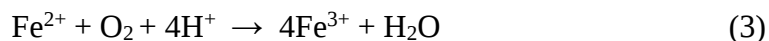
2. Aktivitas bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* menyebabkan meningkatnya laju reaksi secara kimia oksidasi pirit dari 500.000 - 1.000.000 kali. Ion Fe^{3+} berperan oksidan sangat kuat, sehingga reaksi yang terbentuk adalah:



Reaksi tersebut menyebabkan pH larutan turun secara drastis dan akan



terbentuk :



Ion Fe^{3+} yang dihasilkan akan digunakan lagi oleh *Thiobacillus ferrooxidans* membentuk AAT secara terus menerus, sehingga sekali saja AAT terbentuk, maka tidak dapat dihentikan hingga ratusan tahun.

Berdasarkan reaksi tersebut, maka diketahui bahwa bahan mineral yang dioksidasi adalah mineral pirit (FeS). Selanjutnya keberadaan bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* akan menggunakan sulfur sebagai sumber energi dan dapat juga memperoleh kebutuhan nutrisi dari atmosfer dan mineral seperti sulfur dan fosfor. Bakteri ini merupakan agen yang akan mempercepat terjadinya reaksi oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} dan ion sulfat. Ion Fe yang terdapat pada mineral pirit tersebut kemudian akan larut menjadi presipitat yang dibebaskan ke dalam air dan akan membentuk suatu senyawa $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang berwujud selaput seperti *jelly* berwarna merah orange sehingga disebut *yellow boy*. *Yellow boy* pada dasar perairan akan menghambat pertukaran udara sehingga dapat membunuh organisme akuatik (fahrudin, 2018). Berikut adalah gambar *yellow boy* pada hilir sumber AAT (**Gambar 6**).



Gambar 6 *Yellow boy* pada hilir sumber AAT (Jones, 2016)

2.3.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kualitas AAT

Kualitas air asam tambang dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut:



1. (Tingkat keasaman) dan sulfat

ria dkk. (2014) dalam Ngafifuddin dkk. (2017) menjelaskan bahwa, pH (*potential hydrogen*) merupakan jumlah konsentrasi ion H^+ pada suatu larutan yang memberikan tingkat kemasaman atau keasaman pada larutan tersebut.

Irawan dkk. (2016) dalam Busyairi dkk. (2019) menyatakan bahwa AAT memiliki nilai pH yang rendah ($\text{pH} < 4$). Dhir (2018) menyatakan bahwa air asam tambang dianggap sebagai bahan polutan karena memiliki tingkat kemasaman tinggi dan kadar anion terlarut (sulfat, nitrat, klorida, arsenat, dll.) yang sangat tinggi.

2. TSS (*total suspended solid*)

Menurut Said (2014) dalam Harahap (2017), air asam tambang selain memiliki pH yang sangat rendah, juga memiliki TSS yang sangat tinggi didalam pengelolaan air limbah tambang. Hal tersebut terjadi pada saat tahap pembukaan lapisan penutup area tambang. Saat hujan turun, air limpasan yang terbentuk akan membawa partikel-partikel padatan yang sangat halus.

3. Besi (Fe) dan mangan (Mn)

Besi (Fe) merupakan salah satu logam yang pada kerak bumi menempati posisi keempat terbesar. Besi ditemukan dalam bentuk kation ferro (Fe^{2+}) dan ferri (Fe^{3+}) (Kiswanto dkk., 2020). Dimkic *et al.* (2008) dalam Kiswanto dkk. (2020) menjelaskan bahwa mangan adalah kation logam yang memiliki karakteristik kimia yang mirip dengan besi. Mangan berada dalam bentuk manganous (Mn^{2+}) dan manganik (Mn^{3+}). Kandungan mangan yang tinggi terdapat pada perairan dengan pH yang rendah. Irawan dkk. (2016) dalam Busyairi dkk. (2019) menyatakan bahwa AAT memiliki nilai pH yang rendah ($\text{pH} < 4$). Nilai pH yang rendah dalam AAT menyebabkan mudahnya logam-logam tertentu larut seperti besi dan mangan. Hal tersebut tampaknya sesuai dengan pernyataan Dhir (2018) yang menyatakan bahwa air asam tambang mengandung ion logam beracun (Fe, Zn, Cd, Al, Cu, Pb, dsb), anion terlarut (sulfat, nitrat, klorida, arsenat, dll).

2.3.4 Dampak AAT

Eksistensi AAT dapat menyebabkan menurunnya kualitas air baik air permukaan maupun air tanah. Jika terjadi *overflow* dipenampungan AAT karena curah hujan tinggi maka AAT akan dapat mengalir dan masuk kedalam aliran sungai yang akan berdampak buruk terhadap kelangsungan hidup biota darat dan air sehingga akan berdampak pula pada masyarakat yang tinggal di aliran sungai (Arifin dkk., 2019). Berikut adalah dampak negatif dari anti dan Saputra, 2022).



1. Bagi masyarakat sekitar

Dampak AAT tidak secara langsung dirasakan oleh masyarakat setempat karena air yang dilepaskan kesungai telah melalui proses penetralan dan pemantauan disetiap harinya, namun apabila tetap terjadi pencemaran akibat AAT yang dilepaskan kesungai maka bota perairan akan terganggu dan mati sehingga akan mengganggu mata pencaharian penduduk.

2. Bagi biota perairan

Keberadaan AAT pada air permukaan akan menyebabkan berkurangnya keanekaragaman biota perairan seperti plankton dan benthos. Plankton dan benthos merupakan *bioindicator* kualitas perairan. Apabila perairan memiliki kualitas yang baik maka populasi benthos dan plankton akan melimpah, dan sebaliknya apabila kualitas perairan buruk maka biota perairan tersebut akan tidak mampu bertahan hidup.

3. Bagi kualitas air permukaan

AAT yang mengontaminasi air permukaan akan menyebabkan menurunnya kualitas air permukaan tersebut. Parameter kualitas air yang dapat mengalami perubahan akibat keberadaan AAT yaitu pH, padatan terlarut, sulfat, Fe, dan Mn.

2.3.5 Rekayasa Remediasi AAT

Air asam tambang (AAT) yang terbentuk dari aktivitas penambangan batu bara terbuka, saat ini merupakan salah satu tantangan lingkungan terbesar yang dihadapi oleh industri pertambangan (Hengen *et al.*, 2014). Permasalahan terjadi ketika air hujan atau air tanah yang tercampur dengan batuan dilokasi tambang yang mengandung mineral sulfida tertentu yang ada di dalam batu bara, sehingga menyebabkan air tersebut bersifat sangat asam dan biasanya mengandung logam terlarut tinggi seperti zat besi serta mangan. Selain itu pada saat kegiatan penambangan air tanah atau air hujan yang terkumpul di dalam kolam atau lubang bekas galian tambang selain bersifat asam juga sering mengandung zat padat tersuspensi (*suspended solids*, SS) dengan konsentrasi yang tinggi. Pada saat pengerukan batu bara air tersebut harus dikeringkan atau dibuang terlebih dahulu,

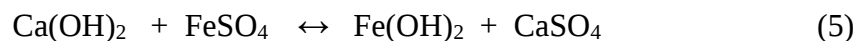
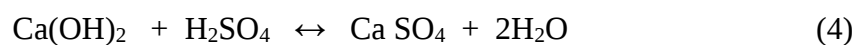
sebelum air tersebut dibuang atau dialirkan ke badan air harus terlebih dahulu dilakukan pengolahan sampai memenuhi baku mutu sesuai dengan yang berlaku (Said, 2014).



Pembentukan AAT merupakan fenomena alam dan pembentukannya tidak dapat dihentikan sama sekali. Tindakan pencegahan memainkan peran penting dalam mengendalikan pembentukan tetapi bahkan jika pembentukan AAT berlanjut pada tingkat yang berbahaya, maka harus direncanakan perawatan yang tepat (Patel *et al.*, 2018). Pengolahan AAT agar dapat memenuhi baku mutu dapat dilakukan dengan beberapa metode. Berikut adalah metode-metode dalam pengolahan AAT:

1. Metode aktif

Metode aktif merupakan metode pengolahan AAT yang dilakukan dengan menambahkan bahan kimia atau agen penetralisir lainnya secara terus menerus, contohnya seperti bahan alkalin (batu kapur, kapur tohor, dsb), bahan oksidan (hidrogen peroksida, alun, dsb), dan koagulan (aluminium sulfat, ferro sulfat, natrium aluminat, dsb), sehingga akan meningkatkan nilai pH, mempercepat laju reaksi oksidasi besi fero (Fe^{2+}), dan menyebabkan pengendapan sebagian besar logam-logam larut sebagai hidroksida atau karbonat (Munawar, 2017). Berikut adalah reaksi penetralan asam dengan kapur (Samosir dan HAR, 2021):



Coulton *et al.* (2003) dalam RoyChowdury *et al.* (2015) menyatakan bahwa proses pengolahan aktif memiliki kelebihan yaitu tidak memerlukan ruang atau konstruksi tambahan, proses lebih cepat dalam menghilangkan keasaman dan logam, dan biaya rendah dalam pembuangan lumpur dibandingkan dengan teknik pengolahan secara pasif. Menendez *et al.* (2000); Ziemkiewicz *et al.* (1997); Zurbuch (2011) dalam Skousen *et al.* (2018) menyatakan bahwa kapur telah digunakan untuk menaikkan pH dan mengendapkan logam dalam air asam tambang selama beberapa dekade ini. Namun kapur tidak sering digunakan dalam perawatan kimia rutin dari AAT karena lambat untuk bereaksi dan larut.

Lebih lanjut Skousen (1996); Lottermoser (2007); Evangelou (1985);

Lottermoser (1990); Lottermoser (2007) dalam Munawar (2017) menjelaskan bahwa metode aktif memiliki beberapa kekurangan yaitu memerlukan modal besar karena memerlukan biaya operasional tinggi dan tenaga kerja yang banyak serta harus



dilakukan selama waktu yang tidak dapat ditentukan. Industri pertambangan di Amerika Serikat menghabiskan lebih dari 1 juta US\$ per hari untuk pembiayaan metode ini. Pernyataan tersebut nampaknya sesuai dengan pernyataan Hilson dan Murck (2001) dalam Ayangbenro *et al.* (2018) yang menyatakan bahwa pengolahan AAT secara konvensional (secara aktif) melalui penambahan basa, presipitasi kimia, pertukaran ion, dsb. membutuhkan sumber daya keuangan yang besar dalam hal modal dan biaya operasional. Selain itu, sebagian besar proses ini sering melibatkan penggunaan bahan kimia yang dapat mengakibatkan polusi sehingga memerlukan pembersihan tambahan yang juga memerlukan biaya.

2. Metode Pasif

Sistem pengolahan pasif merupakan proses yang lebih lambat dari sistem pengolahan aktif dan dilakukan oleh proses gravitasi, geokimia dan biologi. Sistem pengolahan pasif secara efisien menghilangkan keasaman dan logam dari AAT dalam bio-sistem. Sistem ini ramah lingkungan, energi rendah dan sistem pengolahan AAT yang berkelanjutan (Patel *et al.*, 2018). Skousen *et al.* (2000); Taylor *et al.* (2005) dalam Suryatmana dkk. (2020) menyatakan bahwa metode pasif memiliki sistem yang lebih baik daripada metode aktif yaitu dapat bekerja tanpa penambahan input dengan frekuensi tinggi. Metode ini juga dianggap tidak memerlukan perawatan yang intensif dibanding dengan metode aktif. Penanganan AAT dengan metode pasif dapat meningkatkan pH pada kisaran angka 7,5-8,0, sedangkan dengan perlakuan aktif dapat mencapai angka 14 (melebihi baku mutu air limbah penambangan batu bara yaitu hanya berada pada nilai 6,0-9,0. Lebih lanjut Munawar (2017) menyatakan bahwa berbagai riset telah membuktikan bahwa metode aktif memerlukan biaya yang sangat mahal karena memerlukan tenaga kerja yang banyak, dana tinggi dalam pengoperasiannya, serta harus dilakukan sepanjang tahun. Oleh karena itu dalam beberapa dekade terakhir metode pasif lebih berkembang dalam penanganan limbah air asam tambang.

Munawar (2017); Skousen *et al.* (2016) menyatakan bahwa metode pengolahan AAT dibedakan menjadi dua yaitu metode aktif (*active treatment*) menggunakan bahan penetral seperti kapur dan metode pasif (*passive treatment*) yang dibagi menjadi dua yaitu sistem geokimia yang mengandung bahan kimia seperti karbonat contohnya pada metode sistem saluran batu kapur

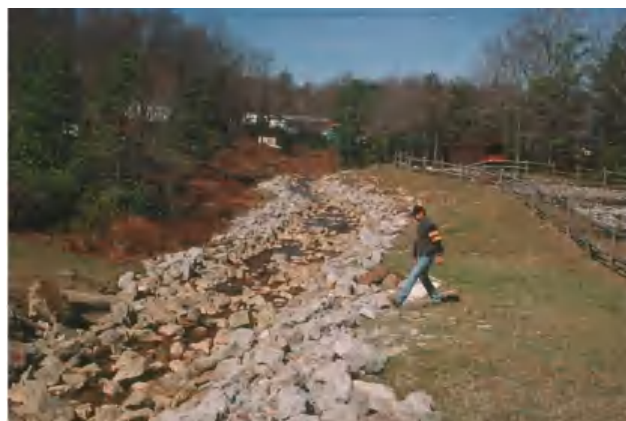


anoksik (*anoxic limestone drains*, ALD) dan saluran batu kapur terbuka (*open limestone channel*, OLC), dan sistem biologis contohnya pada lahan basah buatan (*constructed wetlands*). Lahan basah buatan terdiri dari beberapa tipe yaitu lahan basah aerobik (*aerobic wetlands*), lahan basah anaerobik (*anaerobic wetlands*), dan lahan basah aliran vertikal (*vertical flow system*) atau sering disebut dengan sistem penghasil alkalinitas suksesif (*successif alkalinity producing system*, SAPS).

Berikut adalah metode pasif (sistem geokimia dan biologi) yang umum digunakan dalam proses remediasi atau pengolahan air asam tambang.

a. Saluran batu kapur terbuka (*open limestone channel* / OLC)

Ziemkiewicz dan Bran (1996) dalam Seervi *et al.* (2017) menyatakan bahwa OLC merupakan versi yang paling sederhana dalam pengolahan AAT secara pasif. OLC merupakan suatu saluran terbuka yang ditambahkan agregat kasar batu kapur atau batu gamping berbagai ukuran disepanjang dasar dan sisi saluran tersebut yang kemudian AAT akan dialirkan melaluinya. Lebih lanjut Seervi *et al.* (2017) menyatakan bahwa metode OLC dapat meningkatkan alkalinitas AAT menjadi 6-8. Zipper dan Jage (2010) dalam Munawar (2017) menyatakan bahwa sistem OLC memiliki kelemahan yaitu tidak dapat berlaku pada setiap keadaan. Walaupun metode ini dapat secara bekerja efektif secara sendirian, metode ini lebih sering menjadi bagian dari sistem kombinasi perlakuan pasif yang lain untuk mengurangi beban potensial untuk perlakuan berikutnya. Berikut adalah metode OLC yang dibangun dengan membuat parit kemudian diisi dengan batu kapur (**Gambar 7**).



Gambar 7 *Open limestone channel* (OLC) (Skousen *et al.*, 2016) dan batu kapur tertutup (*anoxic limestone drains* / ALD)

Metode ALD merupakan pengembangan dari metode sebelumnya (OLC). Dalam saluran batukapur anoksik (*anoxic limestone-drain* / ALD), AAT akan



dialirkan pada suatu tumpukan batu kapur (*limestone*) dalam saluran tertutup (ditutup dengan menggunakan bahan seperti plastik atau tanah liat yang dimampatkan atau keduanya setebal kurang lebih 60 cm) untuk menghindari kontak dengan oksigen sehingga mengurangi terjadinya oksidasi besi selama AAT mengalir dalam saluran tersebut (Munawar, 2017). Pernyataan tersebut sesuai dengan pendapat Skousen *et al.* (2016) yang menyatakan bahwa metode ALD menggunakan suatu lapisan penutup untuk operasi yang efektif, ALD harus disegel untuk meminimalkan O_2 masuk. Munawar (2017) menyatakan bahwa metode ALD memiliki keterbatasan yaitu jika tingkat kemasaman AAT lebih besar dari 300 mg/L, maka metode ini tidak dapat bekerja dengan baik. Berikut adalah gambar metode ALD yang dibangun dengan membuat parit yang dilapisi dengan plastik penutup kemudian diisi dengan batu kapur (**Gambar 8**).



Gambar 8 Anoxic limestone drains / ALD (Skousen *et al.*, 2016)

c. Lahan basah aerobik

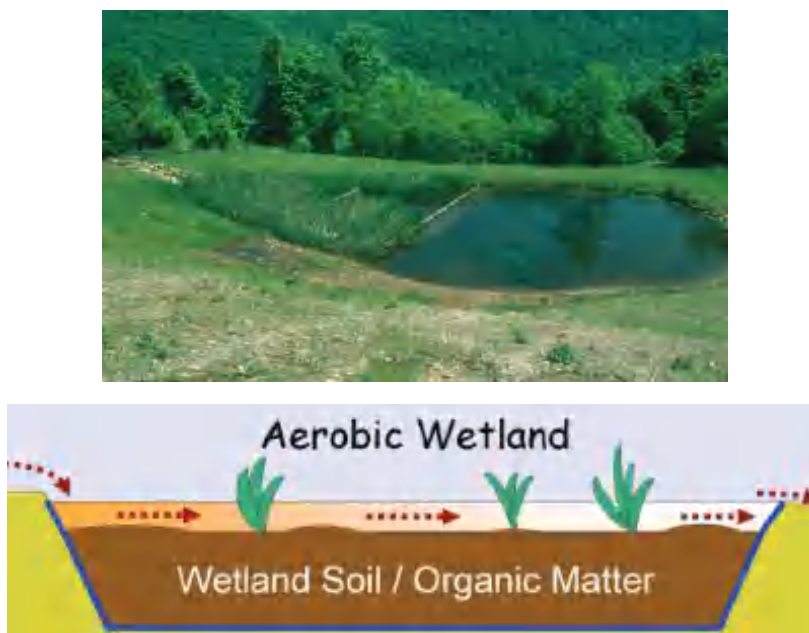
Lahan basah aerobik merupakan jenis sistem pengolahan pasif yang paling sederhana namun sistem ini terbatas pada jenis perairan yang dapat diolah dengan efektif. Sistem ini digunakan untuk mengolah AAT yang agak masam atau basa yang mengandung Fe terlarut tinggi sehingga diketahui bahwa metode ini memiliki keterbatasan untuk menetralkan keasaman. Fungsi utama dari sistem ini yaitu menyediakan aerasi ke AAT yang kemudian akan mengalir diantara vegetasi sehingga memungkinkan Fe terlarut akan mengalami oksidasi, kemudian sistem ini juga memperhitungkan waktu tinggal sehingga akan mengendapkan produk oksida n ini juga mampu menghilangkan mangan (Mn) dengan mekanisme yang gan penghilangan besi (dapat terjadi secara kimia maupun biologis). Mn akan teroksidasi menjadi bentuk fase padat seperti MnO (mangan dioksida),



namun prosesnya sangat lambat saat $\text{pH} < 8$. Agar lahan basah aerobik berhasil menghilangkan Mn, diperlukan area yang luas atau sel lahan basah tambahan (Zipper *et al.*, 2018). Berikut adalah reaksi yang terjadi pada lahan basah aerobik:



Berikut adalah gambar metode lahan basah aerobik yang dibangun dengan membuat kolam yang diisi dengan tanah *wetlands* atau bahan organik kemudian dialiri dengan AAT yang dapat berkontak dengan oksigen (**Gambar 9**).



Gambar 9 Lahan basah aerobik (Skousen *et al.*, 2016; Zipper *et al.*, 2018)

d. Lahan basah anaerobik

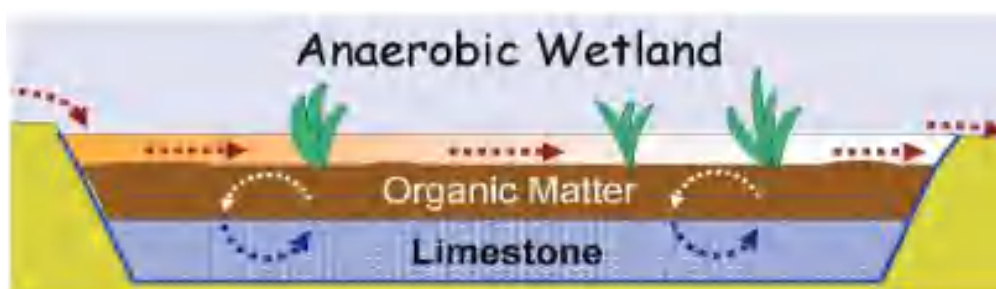
Lahan basah anaerobik merupakan lahan yang direkayasa secara alami dan dapat menghasilkan alkalinitas secara biologis. Perawatannya terutama peran mikroba *Desulfovibrio*. Mekanisme sistem ini meliputi proses pengenceran, penyaringan, pengendapan, hidrolisis, pertukaran ion oleh tanaman, tanah, dan bahan organik, serta reaksi redoks mikroba (Moodley *et al.*, 2017). Said (2014); Seervi *et al.* (2017) menyatakan bahwa lahan basah anaerobik aliran horizontal (*horizontal flow anaerobic wetlands*) merupakan bentuk modifikasi desain dari lahan basah aerobik untuk meningkatkan pH dan pengendapan logam dalam AAT.

Metode ini dilakukan dengan menambahkan tumpukan batu kapur dibawah substrat pupuk, serbuk gergaji, lumut gambut, dan serpihan kayu atau jerami) yang kemudian air asam tambang akan mengalir secara horizontal melalui lapisan sehingga akan memicu pembentukan alkalinitas bikarbonat (HCO_3^-)



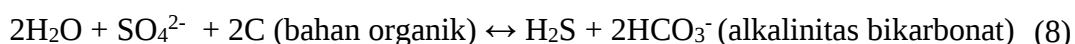
karena adanya penguraian senyawa organik oleh mikroba anaerobik pereduksi sulfat dan pelarutan kalsium karbonat. Bikarbonat yang telah terbentuk selanjutnya akan menetralkan kemasaman dan mengendapkan logam terlarut dalam AAT.

Berikut adalah metode *anaerobic wetlands* yang dibangun dengan membuat kolam yang berisi limestone dan bahan organik yang mengandung bakteri kemudian dialiri dengan AAT. Proses pengolahan AAT terjadi secara anaerobik atau tanpa oksigen oleh bakteri (**Gambar 10**).



Gambar 10 Lahan basah anaerobik (Zipper *et al.*, 2018)

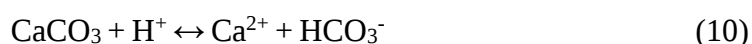
Berikut adalah reaksi reduksi sulfida pada metode *anaerobic wetlands* (Zipper *et al.*, 2018); (Nielsen *et al.*, 2019):



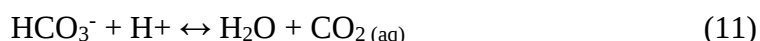
Ketika terdapat logam terlarut dalam air asam tambang maka reduksi sulfat dapat membentuk sulfida logam fase padat sebagai produk akhir alternatif yang kemudian akan terpisahkan dari larutan AAT dan akan mengendap di substrat. Berikut ini, "M" mewakili logam pembentuk sulfida dan "MS" mewakili logam sulfida.



Proses yang menghasilkan alkalinitas lainnya adalah reaksi dengan batu gamping di dalam atau di bawah substrat organik. Berikut adalah reaksinya:



Bikarbonat (HCO_3^-) adalah sumber alkalinitas, dan dapat menetralkan H^+ dan/atau menaikkan pH untuk meningkatkan pengendapan logam yang larut dalam asam. Berikut adalah reaksinya:

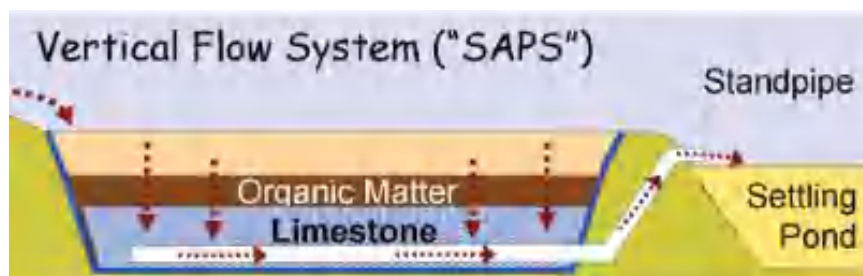


Metode lahan basah ini ramah lingkungan, efisien menghilangkan logam dan logam konsentrasi tinggi, endapan logam stabil di lahan basah dan tidak hilang, produksi volume lumpur rendah, kinerja jangka panjang tinggi,

perawatan rendah, dan hemat biaya (Moodley *et al.*, 2017).

e. *Successive alkalinity - producing systems* (SAPS)

Successive alkalinity-producing systems (SAPS) merupakan bentuk pengembangan lahan basah anaerobik yang dikombinasikan dengan ALD untuk dapat saling menutupi kekurangan dari kedua sistem tersebut (Munawar, 2017). Nairn dan Mercer (2000); Bhattacharya *et al.* (2008) dalam Naidu *et al.* (2019) *Successive alkalinity-producing systems* (SAPS) adalah salah satu alternatif pengolahan AAT yang melibatkan teknik bioremediasi. Metode ini merupakan salah satu pendekatan pengolahan AAT yang umum digunakan. Metode ini menyalurkan AAT secara vertikal melalui lapisan batu kapur dan substrat organik seperti kompos yang berada diatas lapisan batu kapur. Lebih lanjut Patel *et al.* (2018) menyatakan bahwa dalam sistem SAPS, di bagian bawah ditempatkan lapisan bahan alkali seperti batu kapur, dolomit atau terak dengan ketebalan sekitar 0,5-1 m yang dilapisi oleh lapisan kedua substrat organik dengan ketebalan sekitar 0,5-1 m. Bagian atas 1-2 m diisi dengan air AAT. Berikut adalah gambar metode SAPS yang dibangun seperti metode *anaerobic wetlands* namun ditambahkan sebuah saluran atau pipa sehingga AAT akan tersalurkan secara vertikal melewati semua substrat pada lahan basah (**Gambar 11**).



Gambar 11 Vertical flow system atau SAPS (Zipper *et al.*, 2018)

2.4 Bioremediasi AAT

Teknik pengolahan limbah AAT secara konvensional biasanya tidak efisien dan tidak berkelanjutan. Teknik biologis dengan menggunakan mikroba merupakan alternatif yang kompetitif untuk mengolah limbah tambang dan memulihkan logam berat terlarut (Ayangbenro *et al.* 2018). Martins *et al.* (2011) dalam jurnal Ayangbenro *et al.* (2018) menyatakan bahwa bioremediasi adalah teknik inovatif pengolahan tailing asam tambang dengan memanfaatkan potensi organisme mikroorganisme dan tumbuhan) untuk mengurangi efek AAT menjadi



bentuk yang kurang berbahaya, Metode ini merupakan metode alternatif untuk metode konvensional karena efektif dari segi hasil dan biaya, dapat menjaga keseimbangan ekologi, dan membantu memulihkan lingkungan yang tercemar. Neculita *et al.* (2008); Widdel dan Bak (1992) dalam jurnal Nielsen *et al.* (2019) menyatakan bahwa, efisiensi dari proses bioremediasi AAT ini bergantung pada tiga parameter utama yaitu, konsentrasi logam yang terkandung dalam AAT, keberadaan BPS, substrat organik, dan waktu retensi hidrolis. Temperatur juga merupakan parameter yang dapat mempengaruhi efisiensi BPS

2.4.1 Bakteri Pereduksi Sulfat

Bakteri pereduksi sulfat (BPS), merupakan kelompok organisme prokariota anaerob yang menggunakan belerang sebagai akseptor elektron terminal untuk oksidasi senyawa organik. BPS tidak hanya memiliki fungsi ekologis yang signifikan, tetapi juga mempunyai peran penting dalam proses bioremediasi situs yang terkontaminasi (Li *et al.*, 2018). Bakteri pereduksi sulfat (BPS) adalah kelompok heterogen dari mikroorganisme prokariotik yang mempunyai kemampuan dalam reduksi disimilasi sulfat menjadi hidrogen sulfida (H_2S) (Kushkevych *et al.*, 2020). BPS memiliki toleransi tinggi terhadap suhu pertumbuhan yaitu 4 - 92 °C serta terhadap pH pertumbuhan yaitu 2,3 - 10,6 sehingga dapat hidup diberbagai kondisi lingkungan alami (Liu *et al.*, 2018). Tambe *et al.* (2016) dalam Chen *et al.* (2021) juga menyatakan bahwa BPS dapat bertahan hidup pada lingkungan yang bertekanan hingga 507 atm, yang aktif dan dapat menjadi ancaman di lingkungan anaerobik.

Castro *et al.* (2003) dalam Liu *et al.* (2018) menyatakan bahwa BPS termasuk bakteri dan archaea. BPS merupakan mikroorganisme yang memiliki peran penting dengan fisiologi kompleks dan memiliki sifat tertentu yang telah digunakan untuk membuat sistem klasifikasi BPS. Menurut Fahrudin (2010) dalam jurnal Punjungsi (2017) BPS dibedakan menjadi dua berdasarkan penggunaan sulfat yaitu kelompok *assimilatory sulfate reduction* dan *dissimilatory sulfate reduction*.

Kelompok mikroba *assimilatory sulfate reduction* mereduksi sejumlah kecil sulfat untuk sintesis komponen sel yang mengandung sulfur, sedangkan kelompok *dissimilatory sulfate reduction* menggunakan sulfat untuk mendapatkan energi. (2022) menjelaskan bahwa BPS dibagi kedalam delapan genus



berdasarkan morfologi atau bentuk dan proses metabolismenya yaitu, BPS genus *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfomonas*, *Desulfotobacter*, *Desulfolobus*, *Desulfococcus*, *Desulfonema*, dan *Desulfosarcina*. Lebih lanjut dinyatakan oleh Schippers *et al.*, (2010); Martins *et al.* (2011); Anwar (2015) dalam jurnal Ayangbenro *et al.* (2018) menyatakan bahwa mikroorganisme yang dapat digunakan dalam pencucian mikrobial logam dari bijih atau limbah mencakup genera yang berbeda dan termasuk bakteri seperti *Acidiphilium cryptum*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *At. kaldus*, *At. thiooxidans*, *Acidianus brierleyi*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Cronobacter*, *Ferribacterium limneticum*, *Ferropasma acidiphilum*, *Gallionella ferruginea*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *L. ferriphilum*, *Ochrobactrum anthropi*, *Sulfolobus sp.*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *S. acidophilus*, *Thiobacillus denitrificans*, dan *T. thioparus*.

Tripathi *et al.* (2021) menyatakan bahwa BPS mempunyai kemampuan yang unik yaitu mampu bernapas dalam kondisi anaerob (tanpa O₂) dengan menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron terminal yang kemudian direduksi menjadi hidrogen sulfida. BPS dapat hidup di berbagai lingkungan alami seperti sedimen (sedimen air tawar dan rawa asin), lingkungan bawah permukaan yang dalam (sumur minyak dan lubang hidrotermal), dan fasilitas pemrosesan dalam lingkungan industri. Lebih lanjut Kushkevych *et al.* (2020) menyatakan bahwa meskipun BPS bersifat anaerobik dan dalam populasi campuran (biofilm dan plak mikroba), BPS juga dapat hidup bahkan di lingkungan yang semula bersifat aerobik, tetapi hanya selalu dapat hidup dalam kondisi adanya sulfat bebas.

2.4.2 Tanaman

Teknik bioremediasi dengan menggunakan tumbuhan disebut dengan fitoremediasi (Rosariastuti dkk., 2020). Astuti dan Titah (2020) menyatakan bahwa tumbuhan melakukan remediasi terhadap bahan pencemar dengan menggunakan mekanisme untuk mendegradasinya. Mekanisme fitoremediasi dilakukan dengan menyerap bahan pencemar dari tanah atau air oleh sistem perakarannya. Dwitvaningsih dkk. (2019); Irhamni dkk. (2018) menjelaskan mekanisme

an dan akumulasi logam berat oleh tanaman sebagai berikut:

erapan oleh akar tanaman

aman hiperakumulator atau tanaman yang mampu mengakumulasi



polutan dapat melakukan penyerapan polutan apabila polutan tersebut berwujud larutan. Polutan terlarut akan diserap oleh akar tanaman bersamaan dengan penyerapan air, sedangkan senyawa-senyawa yang bersifat hidrofobik akan diserap oleh permukaan tanaman itu sendiri.

b. Translokasi polutan dari akar ke bagian tanaman lain

Pada proses ini setelah polutan masuk melalui akar dan menembus lapisan endodermis akar, maka polutan tersebut akan diangkut oleh jaringan pengangkut (xilem dan floem) menuju bagian tanaman lainnya.

c. Lokalisasi logam pada sel dan jaringan

Setelah polutan diangkut dari akar menuju ke bagian tanaman lain, maka akan terjadi lokalisasi polutan pada bagian sel tertentu untuk menjaga agar tidak terjadi hambatan pada metabolismenya. Pada proses ini tanaman akan berusaha untuk mencegah terjadinya keracunan logam terhadap sel. Tumbuhan dapat melakukan mekanisme detoksifikasi, misalnya dengan menimbun logam di dalam bagian tertentu seperti akar dan lateks.

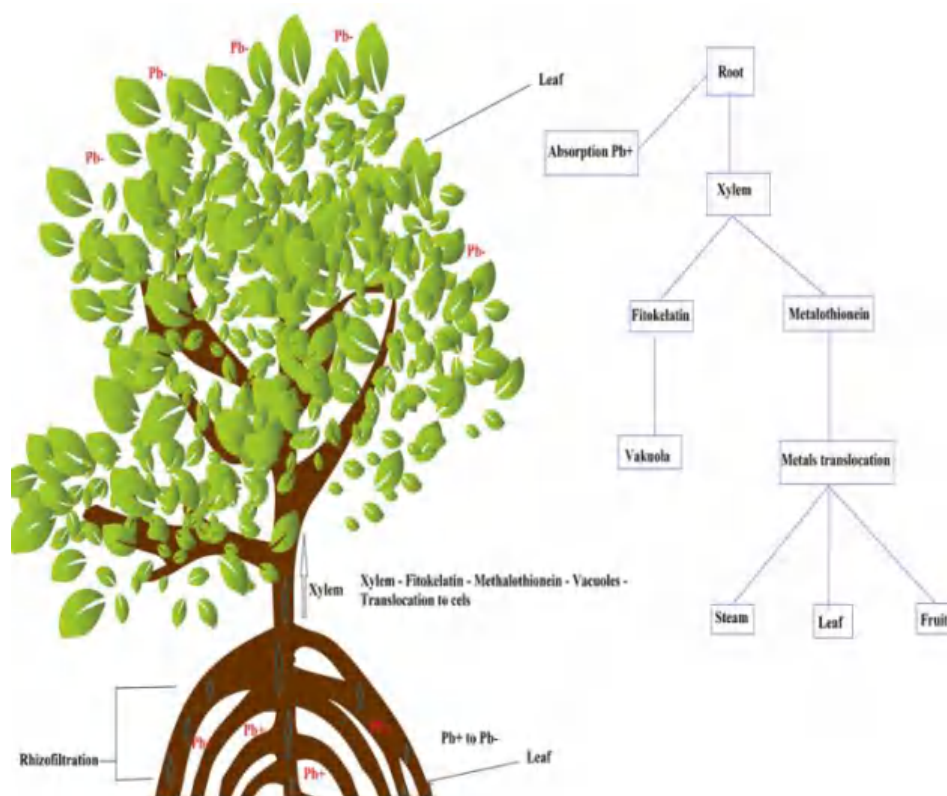
Mangrove telah diteliti secara luas sebagai tanaman yang mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat dalam jaringannya. Sehingga karena kemampuannya tersebut mangrove telah dimanfaatkan untuk mereduksi logam dalam perairan (Wilda *et al.*, 2020). Berdasarkan hasil tinjauan yang dilakukan oleh Lewis *et al.* (2022) diketahui bahwa mangrove *Rhizophora* mampu mengakumulasi logam dalam daun ($Mn > Fe > Zn > Cu = Cd$). Selain itu berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Mullai *et al.* (2014) mangrove *Rhizophora mucronata* mampu mengakumulasi logam Cu, Fe, Mg, Zn, Al, Co, Mn, Cr. Berikut ini adalah gambar bagian-bagian dan klasifikasi mangrove *Rhizophora* sp.



Gambar 12 Mangrove *Rhizophora mucronata*



Kingdom : Plantae
 Divisi : Magnoliophyta
 Kelas : Magnoliopsida
 Ordo : Myrtales
 Famili : Rhizophoraceae
 Genus : *Rhizophora*
 Spesies : *Rhizophora* sp.



Gambar 13 Mekanisme akumulasi logam berat dalam mangrove

Hidayanti (2013); Wulandari dkk. (2018); Prasad *et al.* (2006); Priyanto dan Prayitno (2006); Rungkut dkk (2017) dalam Wilda *et al.* (2020) menyatakan bahwa proses penyerapan logam berat tergantung pada permukaan akar tanaman dan unsur hara dalam substrat. Transportasi dan penyerapan logam berat terjadi melalui membran plasma dan jaringan pembawa sekunder seperti protein saluran atau H^+ protein pembawa, di mana potensial negatif membran membantu penyerapan kation melalui sekunder pembawa. Selanjutnya, kation masuk ke dalam xilem yang dibantu oleh membran pembawa protein. Fitokelatin dan metallothionein merupakan jaringan transpor yang berperan penting dalam translokasi logam berat. Fitokelatin merupakan kelompok protein yang



mengandung asam amino seperti sistein, glisin, dan asam glutamat. Protein ini akan menginduksi tanaman jika tanaman tersebut mengalami stres oleh logam berat. *Phytocrystalline* mengikat ion logam berat, dan kemudian mengangkutnya ke vakuola. Sementara ruang jaringan *metallothionein* disimpan untuk ion logam berat berlebih, kemudian juga mengangkut protein untuk logam berat berlebih dari sel ke sel lain. Faktor-faktor yang mempengaruhi pengangkutan zat organik pada tumbuhan adalah: 1) tekanan dari akar yang mendorong air ke atas, 2) transpirasi daun, dan 3) kapilaritas xilem. Berikut adalah mekanisme akumulasi logam pada mangrove.

2.5 Bahan Organik

Stevenson (1994) dalam Wawan (2017) bahan organik adalah semua bahan yang berasal dari makhluk hidup contohnya yaitu, semua bahan yang berasal dari tumbuhan (daun, batang, akar, bunga dan buah) dan semua bahan yang berasal dari hewan (kulit, bulu, daging, cangkang, telur, dan kotoran). Chen *et al.* (2014); Cocos *et al.* (2002); Di *et al.* (2018); Shao *et al.* (2011); Chang *et al.* (2000); Zhang *et al.* (2016) dalam Wang *et al.* (2021) menyatakan bahwa bakteri pereduksi sulfat (BPS) membutuhkan sumber karbon yang cukup untuk memastikan aktivitas biologisnya dalam mengolah AAT. Hingga saat ini, lebih dari 100 bahan organik telah ditemukan sebagai sumber karbon bagi BPS. Bahan organik ini terutama mengandung dua jenis zat utama yaitu senyawa organik (seperti natrium laktat, etanol, glukosa, dll.) dan bahan biomassa (termasuk serbuk gergaji, serbuk gergaji, jerami, dll.). Beberapa masalah, seperti konsentrasi COD yang berlebihan pada efluen awal dan kekurangan sumber karbon berikutnya, dapat muncul jika senyawa organik digunakan sebagai sumber karbon. Sedangkan bahan biomassa dapat menyediakan sumber karbon yang stabil untuk BPS melalui pelepasan sumber karbon secara berkelanjutan. Namun dilaporkan bahwa bahan biomassa murni sulit digunakan oleh BPS. Beberapa penelitian menemukan bahwa sumber karbon biomassa jarang terdegradasi oleh BPS dengan cepat. Oleh karena itu, sangat penting untuk mencari bahan biomassa yang ekonomis dan stabil yang dapat mudah digunakan oleh BPS sebagai sumber karbon pelepasan berkelanjutan untuk mengolah AAT.



2.5.1 Limbah Organik

Moodley *et al.* (2017) dalam penelitiannya menyatakan bahwa AAT adalah masalah lingkungan utama dan tetap demikian meskipun tersedia banyak teknik remediasi. Banyak metode yang dapat digunakan untuk memulihkan AAT terbatas dalam penerapannya karena kinerja yang buruk, biaya tinggi, penggunaan bahan kimia berbahaya, penipisan sumber daya alam, dan menghasilkan limbah lebih lanjut. Sebagai akibat dari keterbatasan tersebut dan karena kebutuhan ini akan keberlanjutan maka perlu dilakukan penggunaan bahan limbah atau produk sampingan dari industri lain untuk remediasi AAT.

Nielsen *et al.* (2019) menyatakan bahwa bakteri pereduksi sulfat (BPS) memerlukan sumber karbon dalam aktivitasnya. Sumber karbon BPS dapat berupa karbon kompleks dan karbon sederhana. Karbon organik kompleks seperti kompos jerami, atau kompos dari campuran kotoran ternak, jerami, tongkol jagung dsb, serta karbon sederhana seperti etanol, laktat, sukrosa, glukosa, dan selulosa. Dari pernyataan tersebut maka diketahui bahwa beberapa limbah organik atau produk sampingan dari industri lain dapat dijadikan sebagai sumber karbon BPS.

Polutan organik non-polar lebih disukai untuk dapat diserap ke bahan substrat yang sangat kaya akan bahan organik seperti tanah, kompos dan limbah pertanian atau agroindustri melalui proses hidrofobik. Polutan polar atau ionik secara dominan diserap ke bahan substrat melalui interaksi elektrostatis atau pertukaran ionik (Li *et al.*, 2014). Aji dan Kurniawan (2012) dalam Dini dkk. (2016) menyatakan bahwa limbah pertanian adalah sejenis bahan polimer selulosa alami dengan biomassa besar, dapat terurai secara hayati, ramah lingkungan, dan energi hijau. Limbah pertanian atau agroindustri biasanya terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Hemiselulosa adalah polisakarida polimer yang terdiri dari berbagai gugus gula dan gugus asam uronat. Selulosa adalah unsur yang paling melimpah dan penyusun utama dinding sel tumbuhan. Selulosa mempunyai kemampuan untuk mengadsorpsi logam berat. Sehingga dengan pernyataan tersebut maka dapat diketahui bahwa limbah pertanian selain berperan sebagai bahan organik untuk memenuhi kebutuhan nutrisi BPS, juga dapat berperan adsorben logam berat akibat adanya selulosa yang mampu mengabsorpsi logam berat.



Berikut adalah limbah organik dari kegiatan agroindustri yang digunakan sebagai sumber karbon atau nutrisi bagi bakteri pereduksi sulfat dan dijadikan sebagai komponen penunjang pengolahan AAT dalam penelitian ini.

1. Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit merupakan salah satu jenis limbah organik. Tandan kosong kelapa sawit memiliki ketersediaan yang melimpah sehingga dapat menjadi bahan yang sangat potensial untuk digunakan sebagai media dalam *passive treatment* pengolahan AAT karena mampu meningkatkan pH dalam AAT (Nugraha dkk., 2020). Hal tersebut didukung dengan adanya penelitian Mazlina *et al.* (2022) melaporkan bahwa, tandan kosong kelapa sawit dapat digunakan sebagai media pembawa BPS yang mampu mereduksi sulfat dan menurunkan kandungan Fe dan Mn yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Sehingga dengan penggunaan tandan kosong kelapa sawit sebagai media pembawa BPS dapat meningkatkan pH tanah dengan kandungan sulfat yang sangat masam.



Gambar 14 Tandan kosong kelapa sawit (TKKS)

2. Daun kayu putih

Limbah daun kayu putih di unit pengolahan pabrik minyak kayu putih belum dimanfaatkan secara optimal. Limbah daun kayu putih dapat dibuat menjadi kompos dengan kandungan C-organik, Ntotal, P_2O_5 total, K_2O total, bahan organik, dan KTK sangat tinggi, dan pH yang netral (Ertanto dkk., 2022). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Dewani (2015) yang menggunakan daun kayu putih

ahan untuk mengolah air asam tambang memperoleh hasil bahwa limbah mampu meningkatkan pH, menurunkan TSS, dan logam Fe serta Mn dalam tambang.





Gambar 15 Limbah daun kayu putih (LDKP)

2.5.2 Sedimen *Wetlands*

Menurut Pei *et al.* (2012); Dordio dan Carvalho (2013); Tol, (2001); Haberl *et al.* (2003); Reddy dan DeLaune (2008); dalam Li *et al.* (2014) menyatakan bahwa substrat juga termasuk dalam komponen pendukung dalam lahan basah buatan yang dirancang, terutama pada lahan basah buatan aliran bawah permukaan. Substrat di lahan basah buatan bukan hanya berperan dalam mendukung pertumbuhan mikroorganisme dan tanaman, tetapi juga berkontaminasi secara langsung dengan kontaminan melalui proses penyerapan. Penyerapan polutan ke permukaan substrat melibatkan suatu mekanisme seperti partisi hidrofobik, interaksi *van der waals*, interaksi elektrostatis, pertukaran ion, dan kompleksasi permukaan.

May (2017) dalam Fahrudin dkk. (2014) melaporkan bahwa beberapa penelitian telah menggunakan sedimen dari lahan basah atau *wetlands* sebagai sumber bahan organik bagi bakteri pereduksi sulfat. Penggunaan sedimen atau substrat berlumpur yang merupakan habitat bakteri pereduksi sulfat merupakan cara yang dilakukan dalam bioreaktor yang tidak diinokulasikan lagi mikroba dari luar, hal ini karena pada sedimen tersebut telah secara alami mengandung mikroba. Fahrudin dkk. (2014); Fahrudin *et al.* (2021) melaporkan bahwa, sedimen rawa dan sawah yang dialiri AAT mampu meningkatkan pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat, meningkatkan kadar pH, serta menurunkan kadar sulfat dalam air tersebut sehingga dapat menangani masalah pencemaran akibat AAT.



Ash-Bottom Ash (FABA)

urdani (2008) dalam Saputra dkk. (2021); Fadhilah *et al.* (2022) menyatakan bahwa *Fly ash-bottom ash* (FABA) adalah material yang memiliki ukuran partikel yang halus berwarna keabu-abuan dan merupakan limbah hasil

pembakaran batu bara. FABA mengandung beberapa unsur kimia antara lain silika (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Selain itu juga mengandung unsur tambahan lainnya yaitu magnesium oksida (MgO), titanium dioksida (TiO_2), alkalin (Na_2O , dan K_2O), belerang trioksida (SO_3), fosfor oksida (P_2O_5), dan karbon. Lebih lanjut, Nugraha dan Rolliyah. (2021) menyatakan bahwa mineral silikat adalah sumber utama penetral asam di lingkungan. Hasil peluruhan silikat akan bereaksi dengan H^+ , hasil pelarutan kation, dan *silicic acid*, untuk kemudian membentuk mineral sekunder. Secara fisik, seluruh FABA memiliki karakteristik yang hampir sama, dimana *fly ash* didominasi oleh material lempung dan liat dan *bottom ash* didominasi oleh pasir. Karena sifat alami dari material pozzolan yang ada didalam fly ash yang dapat mengeras, material ini hanya dapat melepaskan alkalinitas dari bagian permukaan. Oleh karena itu, untuk memaksimalkan pelepasan alkalinitas dari FABA, material harus dicampur dengan material yang lebih berongga (porous) seperti *bottom ash* yang dapat mengurangi pengerasan sehingga alkalinitas dapat dikeluarkan dari bagian dalam lapisan material tersebut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Saputra dkk. (2021) memperoleh hasil penggunaan 2 gr FABA optimal mampu meningkatkan pH 400 mL AAT dari pH 3,74 menjadi pH 7,24.



Gambar 16 *Fly ash-Bottom ash*



2.7.1 Jenis-Jenis *Constructed Wetlands*

an basah buatan (*constucted wetlands*) adalah sistem pengolahan limbah an cara meniru proses alami. *Constructed wetlands* dirancang dengan han basah alami seperti rawa-rawa, padang rumput basah, pasang surut

yang terkena tanah, dataran banjir, dan lahan basah di sepanjang alur sungai. Sistem ini terdiri dari vegetasi, media, dan mikroorganisme yang berpotensi dalam mengolah air limbah dengan cara menghilangkan atau mengurangi kontaminan berbahaya dari limbah tersebut sehingga dapat meningkatkan kualitasnya. Hal ini dapat menjadi salah satu upaya dalam konservasi air (Hasan dan Suprpti, 2021).

Suprihatin (2014) dalam Ashari dkk. (2020); Tee et al. (2012) dalam jurnal Afifah dan Mangkoedihardjo (2018); Parde *et al.* (2020) menyatakan bahwa *constructed wetlands system* secara umum dibedakan menjadi dua tipe yaitu, sistem aliran permukaan (*surface flow constructed wetlands*) atau *free water surface* dan sistem aliran bawah permukaan (*sub-surface flow*). *Sub-surface flow* dapat diklasifikasikan lagi berdasarkan arah alirannya yaitu, *vertical flow* (VF) dan *horizontal flow* (HF). Berikut adalah jenis-jenis *constructed wetlands*:

1. *Free water surface* (FWS) atau *surface flow* (SF)

Free water surface adalah lahan basah alami dimana air limbah mengalir langsung diatas permukaan substrat.

2. *Subsurface flow* (SSF)

Air mengalir secara keseluruhan melalui bawah permukaan tanah atau media, sehingga air tidak berkontak langsung dengan udara. Pada tipe ini, air limbah mengalir melalui tanaman yang ditanaman pada suatu media yang berpori. Berdasarkan pola alirannya, dapat diklasifikasikan seperti berikut:

a. *Horizontal subsurface flow* (HSSF)

Horizontal subsurface flow atau lahan basah aliran horizontal merupakan sistem yang mengalirkan air limbah secara horizontal didasar lahan basah yang dibangun.

b. *Vertical subsurface flow* (VSSF)

Vertical subsurface flow adalah lahan basah dimana air limbah terendam dari bagian atas lahan basah dan dialirkan keluar dari bagian bawah sehingga mengalir secara vertikal melalui *bed*.

3. *French vertical flow constructed wetlands*



an basah buatan yang berbasis di Prancis adalah lahan basah buatan aliran dua tahap yang disusun secara paralel dan berfungsi secara seri. Jenis ini an basah yang dibangun secara vertikal dan memiliki efisiensi yang sama an basah aliran vertikal tetapi menghemat biaya konstruksi.

4. *Hybrid constructed wetlands*

Lahan basah ini merupakan sistem yang memiliki perlakuan bertingkat dengan kombinasi antara *horizontal flow* dan *vertical flow*.

5. *Baffled sub-surface flow constructed wetlands*

Baffled sub-surface flow merupakan lahan basah yang terdiri dari *baffle* sepanjang lebar lahan basah yang mengarahkan air limbah untuk mengalir naik turun melalui dasar lahan basah. Sistem ini menyediakan jalur yang panjang ke air limbah dan lebih banyak waktu kontak antara air limbah dan media.

6. *Aerated constructed wetlands*

Guna memenuhi kebutuhan oksigen, lahan basah buatan ini menjadi pilihan terbaik. Lahan basah ini membutuhkan lebih sedikit energi daripada perawatan konvensional. Karena rendahnya ketersediaan oksigen, bahan organik terurai pada tingkat yang lebih rendah. Oleh karena itu, efisiensi lahan basah buatan ditingkatkan dengan menggunakan aerator.

2.8 Kriteria Desain Lahan Basah Buatan

Kriteria desain yang sangat penting dalam perencanaan CW terdiri dari waktu detensi hidrolisis (*hydraulic detention time/HRT*), kedalaman basin (panjang dan lebar), laju beban BOD₅ (*BOD loading rate*), dan laju beban hidrolisis (*hydraulic loading rate/HLR*). Kriteria desain *constructed wetlands* limbah tambang batu bara mengacu pada Metcalf and Eddy (2001); Wood (1995); Hedin, *et.al* (1994) dalam peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2020. Kriteria desain untuk tiap jenis lahan basah buatan dapat dirangkum seperti dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 1 Kriteria desain *constructed wetlands* limbah tambang batu bara

Parameter Desain	Satuan	Nilai	
		<i>Free Water System (FWS)</i>	<i>Subsurface Flow (SSF)</i>
Waktu tinggal	Hari	4-15(*)	4-15(*)
Kedalaman air	Ft	0,3-2,0	1,0-2,5
BOD loading rate	Lb/acre.d	< 60	< 60
<i>Hydraulic loading rate</i>	Mgal/acre.d	0,015-0,050	0,015-0,050
<i>Iron loading rate (Fe)</i>	g/m ² .hari	10	
<i>Manganese loading rate (Mn)</i>	g/m ² .hari	0,5	
panjang : lebar)	-	2:1-10:1	
umur pemanenan	Tahun	3-5	



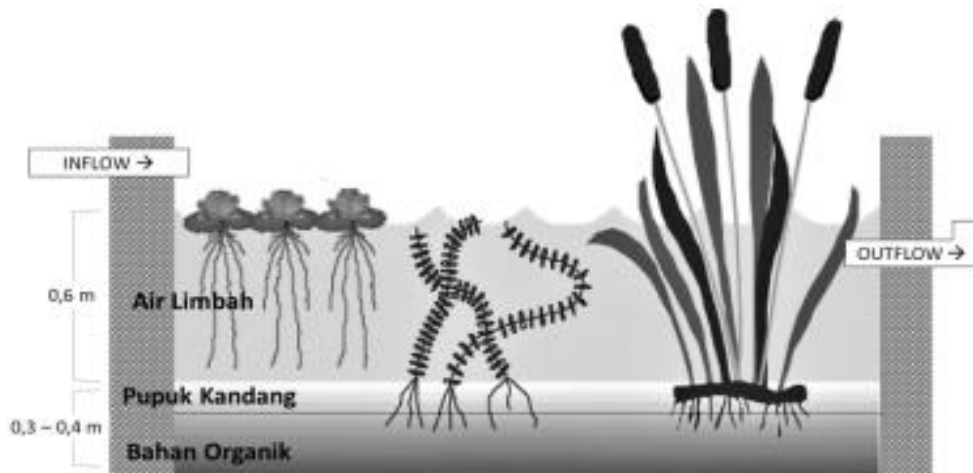
Catatan:

(*) = Disesuaikan dengan hasil uji coba retensi penggunaan bahan organik

ft x 0,3048 = m

lb/acre.d x 1,1209 = kg/ha.d

Mgal/acre.d x 0,9354 = m³/m².d



Gambar 17 Penampang melintang lahan basah buatan
(Permen LHK No.5 Tahun 2022)

2.9 Standar Baku Mutu Air Limbah Pertambangan

Baku mutu lingkungan hidup merupakan ukuran batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi atau suatu komponen yang ada atau harus ada dan/ atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam suatu sumber daya tertentu sebagai unsur lingkungan hidup (Sari, 2018). Berikut adalah standar baku mutu limbah pertambangan batu bara berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan No.8 Tahun 2012 (**Tabel 2**).

Tabel 2 Standar baku mutu limbah penambangan batu bara (air asam tambang)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
Derajat keasaman (pH)	mg/L	6-9
Padatan tersuspensi total (TSS)	mg/L	300
Besi (Fe) total	mg/L	7
Mangan (Mn) Total	mg/L	4



Asam tambang yang dihasilkan oleh PT. Bukit asam akan dilepaskan ke sungai Enim. Peraturan Gubernur Tahun No. 16 tahun 2005 menyatakan untuk mencapai baku mutu air sungai sesuai dengan peruntukan yang telah ditentukan, maka pihak instansi terkait wajib untuk menunjang program

pengelolaan lingkungan secara terpadu. Lebih lanjut menyatakan bahwa peruntukan air sungai Enim adalah sebagai air baku air minum sehingga termasuk dalam kelas I. Adapun standar baku mutu air sungai kelas I berdasarkan SK Gubernur Sumatera Selatan No. 16 tahun 2005 yaitu tertera pada tabel dibawah ini (Tabel 3).

Tabel 3 Standar baku mutu air sungai kelas I

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
pH	(mg/L)	6-9
TSS	(mg/L)	50
Fe	(mg/L)	0,3
Mn	(mg/L)	0,1



2.10 Penelitian Terdahulu

Tabel 4 Penelitian terdahulu

No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
1	1. Ayansina S. Ayangbenro 2. Oluwaseyi S. Olanrwaju 3. Olubukola O. Babalola (2018)	Sulfate-Reducing Bacteria as an Effective Tool for Sustainable Acid Mine Bioremediation	Artikel ini membahas tentang potensi teknik bioremediasi air asam tambang. Pemikiran tentang pengolahan AAT secara biologis didasari karena melihat pengobatan secara konvensional tidak efisien dan tidak berkelanjutan.	Informasi mengenai kemampuan teknik bioremediasi dengan konsorsium bakteri pereduksi sulfat dalam pengurangan polusi pada <i>acid mine tailings waste</i> (AMTW).	Pelaku usaha penambangan memperoleh informasi mengenai metode pengolahan AAT dan dapat menjadikan teknik bioremediasi sebagai alternatif pengolahan limbah air asam tambang.	Membahas penggunaan teknik bioremediasi dengan menggunakan potensi dalam remediasi AAT.	1. Artikel Jurnal: - Hanya mereview, tidak melakukan penelitian atau percobaan. 2. Penelitian ini: - Melakukan eksperimen untuk membuktikan kemampuan BPS dalam menyisihkan kontaminan dalam AAT.
2	1. Sun Kyung Hwang 2. Eun Hea Jho (2018)	Heavy Metal and Sulfate Removal From Sulfate-Rich Synthetic Mine Drainages Using Sulfate Reducing Bacteria	Artikel ini membahas tentang pemanfaatan tanah area tambang untuk pengolahan AAT. Studi tentang kapasitas pereduksi sulfat atau kapasitas penghilangan logam berat oleh isolat BPS dari area tambang masih terbatas sehingga masih perlu dilakukan penelitian.	Penggunaan kultur bakteri asli dari tanah area tambang dan BPS jenis <i>D. Desulfuricans</i> dapat menyisihkan Zn yang tinggi dalam AAT.	Upaya konservasi AAT dengan menggunakan potensi isolat bakteri asli dari tanah area tambang dan BPS jenis <i>D. desulfuricans</i> sehingga AAT tidak mencemari lingkungan sekitar.	- Menggunakan isolat BPS dalam remediasi AAT . - Bertujuan untuk menyisihkan kontaminan dalam AAT.	1. Artikel Jurnal: - Menggunakan AAT sintetik. - Melakukan isolasi dan identifikasi BPS. - Menggunakan tanah area tambang dan menggunakan satu jenis BPS tunggal yaitu jenis <i>Desulfovibrio desulfuricans</i>



No	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
							2. Penelitian ini: - Menggunakan AAT langsung dari lokasi penambangan batu bara. - Tidak dilakukan isolasi dan identifikasi jenis BPS. Menggunakan sedimen AAT yang diindikasikan menjadi habitat alami BPS.
3	1. Xin Li 2. Shi-ming Lan 3. Zhong-ping Zhu 4. Chang Zhang 5. Guang-ming Zeng 6. Yun-guo Liu 7. Wei-cheng C. 8. Biao Song 9. Hong Yang	The Bioenergetics Mechanisms and Applications of Sulfate-Reducing Bacteria in Remediation of Pollutants in Drainage: A Review	Telah banyak penelitian tentang metabolisme dan aplikasi BPS namun BPS masih belum sepenuhnya dipahami dan bahkan masih kontroversial. Sehingga artikel ini membahas tentang mekanisme bioenergi dan aplikasi BPS dalam remediasi polutan.	Informasi mengenai mekanisme bioenergi dan aplikasi bakteri pereduksi sulfat dalam remediasi polutan.	Pemahaman sepenuhnya mengenai metabolisme BPS sehingga dapat menjadi referensi untuk dapat meningkatkan kinerja bioremediasi.	Membahas tentang aplikasi dan mekanisme BPS dalam remediasi polutan	1. Artikel Jurnal: - Hanya mereview, tidak melakukan penelitian atau percobaan untuk membuktikan teori. 2. Penelitian ini: - Melakukan eksperimen skala laboratorium untuk membuktikan kemampuan BPS dalam menyisihkan polutan dalam limbah AAT.



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
4	1. Fahrudin 2. Nur Haedar 3. Nursiah La Nafie (2014)	Perbandingan Kemampuan Sedimen Rawa dan Sawah untuk Mereduksi Sulfat dalam Air Asam Tambang (AAT)	Artikel ini membahas tentang pemanfaatan sedimen sawah dan rawa sebagai sumber BPS untuk remediasi AAT.	Data perbandingan kemampuan sedimen rawa dan sedimen untuk mereduksi sulfat dalam AAT.	Timbulnya kesadaran pemilik usaha tambang untuk mengolah AAT dilokasi penambangannya dengan memanfaatkan sedimen.	- Menggunakan potensi BPS dalam remediasi polutan pada AAT. - Menggunakan sedimen sebagai sumber isolat BPS. - Menganalisis penyisihan pH asam AAT.	1. Artikel Jurnal: - Menggunakan dua jenis sedimen sebagai sumber isolat BPS - Tidak menggunakan kombinasi bahan organik dengan tanaman dalam <i>wetlands</i> - Tidak menganalisis penyisihan TSS, Fe, dan Mn - Desain dan dimensi reaktor tidak diperhitungkan 2. Penelitian ini: - Menggunakan satu jenis sedimen yaitu sedimen sebagai sumber isolat BPS - Menggunakan kombinasi bahan organik dengan tanaman - Menganalisis penyisihan TSS, Fe, dan Mn.



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
5	1. Guillaume Nielsen 2. Lucie Coudert 3. Amelie Janin 4. Jean Francois Blais 5. Guy Mercier (2019)	Influence of Organic Carbon Sources on Metal Removal from Mine Impacted Water Using Sulfate-Reducing Bacteria Bioreactors in Cold Climates	Artikel ini membahas tentang pengaruh sumber karbon organik pada penghilangan logam dari air dampak tambang menggunakan bioreaktor bakteri pereduksi sulfat di iklim dingin. Diperlukan periode adaptasi yang lama sebelum konsumsi sumber karbon oleh BPS dimulai, yang mungkin disebabkan oleh suhu dingin.	Data mengenai pengaruh penggunaan bahan organik sederhana (metanol dan etilen glikol) dan bahan organik kompleks (minyak kentang, residu pembuatan bir, gambut, dan jerami) untuk mendukung pertumbuhan BPS pada suhu 5 °C terhadap penurunan konsentrasi sulfat dan penyisihan logam berat.	Pengolahan AAT dapat menggunakan bahan organik sederhana seperti metanol dan etilen glikol karena memiliki efisiensi penyisihan sulfat yang tinggi. Pengolahan AAT akan mencegah kerusakan lingkungan akibat AAT yang terekspos ke lingkungan.	- Menggunakan bioreaktor untuk pengolahan AAT. - Menggunakan sedimen sebagai sumber isolat BPS dan karbon organik untuk pengolahan AAT. - Menganalisis pengaruh penggunaan dua jenis bahan organik dalam penurunan konsentrasi logam berat, dan peningkatan pH dalam AAT	- Dimensi reaktor Diperhitungkan 1. Artikel Jurnal: - Bioreaktor berbentuk tabung. - Desain dan dimensi bioreaktor tidak diperhitungkan. - Menggunakan bahan organik sederhana dan kompleks - Tidak menganalisis TSS. Logam berat yang dianalisis yaitu Zn dan Cd - Tidak menggunakan tanaman. 2. Penelitian ini: - Bioreaktor berbentuk persegi panjang - Desain dan dimensi bioreaktor diperhitungkan - Menggunakan bahan organik kompleks (TKKS dan LDKP)



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outome	Persamaan	Perbedaan
							• Menganalisis nilai TSS. Logam berat yang dianalisis adalah Fe dan Mn, • Menggunakan Tanaman
6	1. Indah Nirtha 2. Nopi Stiyati Prihatini 3. Lisda Pronawati (2021)	Penggunaan Lahan Basah Buatan Aliran Vertikal Bawah Permukaan dengan Tanaman <i>Thypha latifolia</i> dan <i>Cyperus papyrus</i> dalam Menyisihkan Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Sumur Bor	Air sumur bor pada salah satu rumah di Jl. SMK 1 Gambut, kecamatan Gambut Kabupaten Banjar mengandung Fe dan Mn yang melebihi standar baku mutu.	Mengatasi permasalahan kontaminasi logam berat (Fe dan Mn) pada sumur bor di lokasi penelitian dengan metode lahan basah buatan aliran vertikal bawah permukaan dengan tanaman <i>Thypha latifolia</i> dan <i>Cyperus papyrus</i> .	Masyarakat menjadi lebih hati-hati dalam menggunakan sumur bor. Penelitian ini dapat menjadi referensi pengolahan air yang tercemar logam Fe dan Mn.	• Bertujuan untuk mengolah air yang tercemar logam Fe dan Mn. • Menggunakan metode lahan basah buatan aliran vertikal bawah permukaan. • Desain dan dimensi CW diperhitungkan.	1. Artikel Jurnal: • Mengolah air sumur bor yang terkontaminasi logam berat. • Menggunakan tanaman <i>Thypha latifolia</i> dan <i>Cyperus papyrus</i>. • Waktu pengamatan yaitu pada hari ke-1, ke-3, dan ke-5. 2. Artikel Jurnal: • Mengolah AAT yang mengandung bahan atau zat kontaminan (logam berat, TSS, dan pH). • Menggunakan tanaman mangrove <i>Rhizophora</i> sp.



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
7	1. Shweta Singh 2. Saswati Chakraborty (2020)	Performance of Organic Substrate Amended Constructed Wetlands Treating Acid Mine Drainage (AMD) of North-Eastern India	Dari lima tambang batu bara di Collieries NEC yang terletak di Margherita, daerah Tinsukia di Assam, India tambang, satu diantaranya yaitu tambang Baragolai dan Ledo dinyatakan sebagai tambang terbengkalai sehingga terbentuk AAT yang tidak terolah.	Model pengolahan AAT dengan <i>constructed wetlands</i> yang efektif dan efisien.	AAT dilokasi tambang dapat diolah sehingga tidak mencemari lingkungan. Selain itu dapat memberikan referensi metode pengolahan AAT secara efektif dan efisien bagi pemilik usaha tambang.	- Menggunakan metode CW dalam mengolah AAT - Bertujuan untuk menyisihkan polutan dalam AAT. - Menggunakan substrat organik dan tanaman	- Waktu pengamatan setiap interval waktu dua-tiga hari sampai memperoleh hasil sesuai standar baku mutu. 1. Artikel Jurnal: - Menggunakan satu reaktor CW dengan lima zona (5 kompartement) dan dilengkapi dengan <i>baffle</i>. - Sistem CW aliran bawah permukaan horizontal (HSSF-CW) - Menggunakan substrat organik berupa kotoran sapi dan cips bambu. - Menggunakan <i>Thypha latifolia</i>. 2. Penelitian ini: - Menggunakan 6 CW dengan 1 komparteme. Sistem CW aliran bawah



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
8	1. Lei Xu 2. Siyu Chen 3. Ping Zhuang 4. Dongsheng Xie 5. Xiao Ling Yu, 6. Dongming Liu 7. Zhianli 8. Xin Sheng Qin 9. Faguo Wang 10. Fuwu Xing	Purification Efficiency of Three Combinations of Native Aquatic Macrophytes in Artificial Wastewater in Autumn	Artikel ini membahas tentang pencemaran sumber air yang disebabkan oleh adanya invasi nutrisi dan biologis yang berlebihan semakin meluas di Cina, yang dapat menyebabkan masalah dalam air minum serta kerusakan serius pada ekosistem jika tidak ditangani dengan baik. Fitoremediasi dapat menjadi solusi yang menjanjikan dalam permasalahan ini dan semakin populer dalam pengolahan air	Data kombinasi tanaman akuatik yang berpotensi dalam fitoremediasi air yang tercemar.	Pencemaran air akibat kelebihan bahan organik dan mikroorganisme di Cina dapat diatasi dengan menggunakan metode yang ditawarkan sehingga dapat mencegah dan mengatasi pencemaran terhadap air minum dan kerusakan ekosistem.	• Menggunakan reaktor. • Menggunakan tanaman sebagai agen remediasi air yang tercemar.	permukaan. • Substrat organik berupa tandan kosong kelapa sawit dan daun kayu putih. • Menggunakan tanaman mangrove 1. Artikel Jurnal: • Mengolah air limbah sintetis yang ditambahkan nutrisi. • Menggunakan empat jenis kombinasi tanaman pada tiap reaktor. 2. Penelitian ini: • Mengolah AAT yang langsung diambil pada area tambang batu bara. • Menggunakan satu jenis tanaman pada tiap reaktor.

(2021)



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
9	1. Pujawati Suryatmana 2. Apong Sandrawati 3. Ikrar Nusantara putra 4. Nadia N. Kamaluddin (2020)	Potensi Bakteri Pereduksi Sulfat dan Jenis Bahan Organik dalam Pengolahan Air Asam Tambang Menggunakan System <i>Constructed Wetlands</i> Tanaman Akar Wangi (<i>Vetiveria zizanioides</i> L.)	Artikel ini membahas tentang efek kombinasi antara BPS dengan jenis bahan organik dalam remediasi AAT pada sistem <i>constructed wetlands</i> metode <i>vertical flow system</i> .	Data pengaruh penambahan BPS dan dua jenis bahan organik (serbuk gergaji dan kompos) terhadap peningkatan nilai pH dalam AAT.	Pemilik usaha pertambangan dapat mengolah AAT dilokasi penambangannya dengan memanfaatkan potensi BPS, bahan organik, dan tanaman seperti yang digunakan dalam penelitian.	- Menggunakan reaktor CW aliran <i>vertical flow system</i>. - Menggunakan potensi BPS, bahan organik, dan tanaman. - Menganalisis perubahan pH pada AAT yang telah melalui proses remediasi. - Menganalisis kondisi tanaman.	1. Artikel Jurnal: - Melakukan isolasi dan inokulasi BPS kedalam reaktor. - Menggunakan kompos dan serbuk gergaji sebagai bahan organik. - Menggunakan tanaman akar wangi. 2. Penelitian ini: - Tidak melakukan isolasi dan inokulasi BPS kedalam reaktor. Langsung menggunakan sedimen sebagai habitat alami BPS. - Menggunakan daun kayu putih dan tandan kosong kelapa sawit - Menggunakan tiga tanaman yaitu mangrove kemudian akan dianalisis kadar logam yang telah diserap.



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
10	1. Ming Liang Zhang 2. Haixia Wang 3. Xuemei Han (2016)	Preparation of Metal-Resistant Immobilized Sulfate Reducing Bacteria Beads for Acid Mine Drainage Treatment	Artikel ini membahas tentang upaya untuk meningkatkan toleransi terhadap logam berat konsentrasi tinggi dan pH rendah dalam AAT yaitu dengan pembuatan manik-manik lumpur BPS terimobilisasi baru (campuran BPRS, jerami jagung, besi valensi nol, pasir silikon, polivinil alkohol (PVA) dan natrium alginat) dan membandingkan dengan pengolahan AAT menggunakan BPS yang <i>ter-suspended</i> .	Data mengenai kemampuan manik-manik lumpur BPS dalam menyisihkan kontaminan dalam AAT.	Pelaku usaha penambangan dapat mengolah limbahnya dengan menggunakan metode yang ditawarkan dalam penelitian ini.	- Menggunakan reaktor skala laboratorium. - Menggunakan BPS dan bahan organik dalam pengolahan AAT - Menganalisis penyisihan sulfat dan logam dalam AAT yang telah melalui proses pengolahan.	1. Artikel Jurnal: - Menggunakan satu reaktor anaerob aliran atas. - Menggunakan media postgate C serta Fe(II) dan sulfat sebagai air limbah sintetik. - Menggunakan manik-manik lumpur BPS yang terimobilisasi dalam pengolahan AAT. - Menggunakan jerami jagung - Tidak menggunakan tanaman 2. Penelitian ini: - Menggunakan enam reaktor berbentuk persegi panjang aliran bawah permukaan vertikal. - Menggunakan limbah asli dari lokasi penambangan. - Menggunakan



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
							sedimen AAT sebagai sumber konsorsium BPS.
							• Menggunakan TKSS dan LDKP • Menggunakan tanaman.
11	1. Firman Aziz Nugraha 2. Hifzil Kirmi 3. Bambang Haryanto 4. Meirta Afiffa (2020)	Analisis Penggunaan Media Tandan Sawit dan Kompos dengan Sistem Aerobic Wetlands dalam Mengolah Air Asam Tambang	Penghilangan kadar kontaminan pada AAT dari PT. Berau Coal dengan memanfaatkan limbah organik pada lokasi sekitar penambangan.	Data tentang kemampuan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan organik untuk menyisihkan kontaminan dalam AAT.	Referensi bagi pemilik usaha penambangan untuk mengolah AAT-nya dengan memanfaatkan limbah organik sekitar.	• Menggunakan reaktor skala laboratorium sistem <i>anaerobic wetlands</i>. • Menggunakan AAT langsung dari lokasi penambangan. • Menggunakan sisten aliran <i>continue</i>. • Melakukan analisis pH, TSS, Fe, dan Mn. • Menggunakan tandan kosong kelapa sawit dalam pengolahan AAT.	1. Artikel Jurnal: • Pengambilan sampel AAT yang telah diolah dilakukan pada hari ke 1,3,5,7 (interval 2 hari). • Menggunakan tanaman ekor kucing. 2. Penelitian ini: • Pengambilan sampel AAT yang telah diolah dilakukan setiap interval dua-tiga hari sampai memperoleh hasil yang sesuai dengan baku mutu lingkungan. • Menggunakan tanaman 3 mangrove



No.	Nama Peneliti	Judul	.Pokok Persoalan	.Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
12	1. Xianjun Wang 2. Junzhen Di 3. Yanrong Dong 4. Yu Yang 5. Bing Liang 6. Fankang Meng 7. Tingting Wang 8. Wenbo An 9. Zengxin Li 10. Jianzhi Guo (2021)	The Dynamic Experiment on Treating Acid Mine Drainage with Iron Scrap and Sulfate Reducing Bacteria Using Biomass Materials as Carbon Source	Penanganan AAT oleh bakteri pereduksi sulfat (BPS) membutuhkan penambahan sumber karbon, sedangkan efektivitas pengolahannya sendiri belum cukup baik. Artikel ini membahas tentang kemampuan beberapa jenis bahan organik dalam penyisihan kontaminan AAT.	Data kemampuan terak tebu, jerami bunga matahari, dan tongkol jagung sebagai sumber karbon BPS untuk menyisihkan logam, sulfat, COD, dan pH masam dalam AAT.	Menjadi referensi untuk meningkatkan efektifitas pengolahan AAT yang menggunakan potensi BPS dengan menggunakan bahan organik seperti yang ada pada penelitian sebagai sumber karbon.	- Menggunakan reaktor eksperimen. - Menggunakan beberapa bahan organik dari biomassa tumbuhan sebagai sumber karbon BPS kemudian menganalisis efektifitas penyisihan kontaminan dalam AAT yang menggunakan sumber karbon berbeda. - Menggunakan lumpur basah yang tergenangi AAT dari penambangan batu bara.	1. Artikel Jurnal: - Menggunakan limbah AAT sintetik. - Menggunakan terak tebu, jerami bunga matahari, dan tongkol jagung sebagai sumber karbon. - Tidak menganalisis pengaruh jenis media secara statistik terhadap penyisihan kontaminan dalam AAT. - Tidak menggunakan tanaman. 2. Artikel Jurnal: - Menggunakan limbah AAT dari tambang batu bara. - Menggunakan daun kayu putih dan tandan kosong kelapa sawit sebagai sumber karbon. - Menganalisis



No.	Nama Peneliti	Judul	Pokok Persoalan	Output	Outcome	Persamaan	Perbedaan
							pengaruh jenis media dan waktu detensi terhadap penyisihan kontaminan dalam AAT. • Menggunakan tanaman.
13	Zahriska Dewani (2015)	Kajian Pemanfaatan Biomassa Daun Kayu Putih dan Bakteri Pereduksi Sulfat dalam Pengolahan Air Asam Tambang	Penelitian ini membahas mengenai potensi bakteri pereduksi sulfat dan daun kayu putih dalam menyisihkan pH, TSS, Fe, dan Mn dalam AAT.	Data penyisihan kontaminan dalam AAT dengan menggunakan isolate BPS dan limbah daun kayu Putih	Menjadi referensi pemanfaatan limbah daun kayu putih dalam pengolahan AAT	• Menyajikan data kemampuan limbah daun kayu putih dalam menyisihkan setiap kontaminan dalam AAT.	1. Artikel Jurnal: • Menggunakan seleksi isolat BPS. 2. Penelitian ini: • Tidak melakukan seleksi isolat BPS. BPS diperoleh secara alami dengan menggunakan sedimen <i>wetlands</i>.
14	1. Indra Saputra 2. Rusli HAR	Pemanfaatan FABA, Tawas, dan Kapur untuk Menetralkan Air Asam Tambang	Penelitian ini membahas tentang penggunaan FABA, tawas, dan kapur dalam meningkatkan pH AAT.	Data perbandingan kemampuan tiga bahan dalam menetralkan AAT.	Menjadi referensi bahan terbaik dalam meningkatkan pH AAT	Menggunakan FABA.	1. Artikel Jurnal: • Menggunakan tiga bahan penetral dalam pengolahan AAT. 2. Penelitian ini: • Menggunakan satu jenis bahan penetral yaitu FABA.

