

TESIS

**ANALISIS MINERALOGI, GEOKIMIA DAN POTENSI
PEMBENTUKAN AIR ASAM TAMBANG PADA *SITE*
TAMBANG BIJIH BESI DI DAERAH TANJUNG
KABUPATEN BONE PROVINSI
SULAWESI SELATAN**

*Mineralogical, Geochemical and Formation Potential Analysis of
Acid Mine Drainage in Iron Ore Mines Site of the Tanjung Area,
Bone District, South Sulawesi Province*

**ANDRI SAPUTRA
D112211001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERTAMBANGAN
DEPARTEMEN TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA
2024**

THESIS

***MINERALOGICAL, GEOCHEMICAL AND FORMATION
POTENTIAL ANALYSIS OF ACID MINE DRAINAGE IN IRON
ORE MINES SITE OF THE TANJUNG AREA, BONE
DISTRICT, SOUTH SULAWESI PROVINCE***

**Analisis Mineralogi, Geokimia dan Potensi Pembentukan Air
Asam Tambang pada *Site* Tambang Bijih Besi di Daerah
Tanjung Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan**

**ANDRI SAPUTRA
D112211001**



**MASTER OF MINING ENGINEERING STUDY PROGRAM
DEPARTEMENT OF MINING ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
HASANUDDIN UNIVERSITY**

**GOWA
2024**

TESIS**ANALISIS MINERALOGI, GEOKIMIA DAN POTENSI
PEMBENTUKAN AIR ASAM TAMBANG PADA *SITE*
TAMBANG BIJIH BESI DI DAERAH TANJUNG
KABUPATEN BONE PROVINSI
SULAWESI SELATAN****ANDRI SAPUTRA
D112211001**

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

Pada tanggal 19 Januari 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT.
NIP. 196807181993091001

Pembimbing Pendamping



Dr. Sufriadin, ST, MT.
NIP. 196608172000121001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli,
ST., MT., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Pertambangan



Dr. Ir. Irzal Nur, MT.
NIP. 196604091997031002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andri Saputra

NIM : D112211001

Program Studi : Teknik Pertambangan

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisis Mineralogi, Geokimia dan Potensi Pembentukan Air Asam Tambang pada *Site* Tambang Bijih Besi Di Daerah Tanjung Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Utama Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT dan Pembimbing pendamping Dr. Sufriadin, ST., MT. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun 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/Prosiding (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol: 1272 (2023) 012036, DOI: 10.1088/1755-1315/1272/1/012036) sebagai artikel dengan judul “*Mineralogical Studies of the Tanjung Iron Mine in the Bone, South Sulawesi: Implication for AMD Generation*”.

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

Gowa, Januari 2024

Yang menyatakan



Andri Saputra

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhana Wata'ala, karena hanya atas izin dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tesis ini dengan judul “Analisis Mineralogi, Geokimia dan Potensi Pembentukan Air Asam Tambang pada *Site* Tambang Bijih Besi di Daerah Tanjung Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan”, Salawat serta salam penulis haturkan kepada Rasullulah Muhammad Sallallahu'alihiwasallam sebagai suri teladan terbaik. Penyusunan tesis ini merupakan syarat terakhir yang harus ditempuh untuk menyelesaikan pendidikan pada jenjang Strata Dua (S-2) di Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

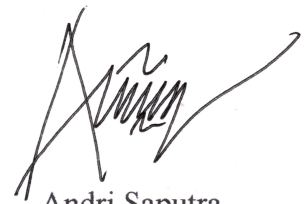
Ucapan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T., selaku ketua program studi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T dan Bapak Dr. Sufriadin, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan memberi arahan kepada penulis. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Dr. Phil.nat Sri Widodo, S.T., M.T., Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. dan Ibu Dr. Eng Rini Novrianti Sutardjo, S.T., M.T., MBA, selaku dosen penguji yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan koreksi terhadap penelitian penulis. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Staf pengajar dan Staf akademik dan tata usaha di lingkungan program studi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang selalu membantu penulis selama penulis melaksanakan studi dan rekan-rekan seperjuangan yaitu keluarga besar mahasiswa Magister Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin terutama angkatan 2021 dan seluruh anggota LBE Hidrologi dan Lingkungan Tambang Universitas Hasanuddin.

Ucapan terima kasih juga diucapkan kepada kedua orang tua penulis yaitu bapak H. Heri Salili dan Ibu Hj. Hani atas segala dukungan dan doa yang diberikan kepada penulis selama penyusunan Tesis ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih pada seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung terutama kepada Ir. Tri Andriyani Hs Kandora, ST., MT., yang telah banyak membantu penulis selama penulisan Tesis. Penulis

menyadari, bahwa penulisan Tesis ini masih terdapat kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu penulis menyampaikan permohonan maaf atas semua kekurangan yang dijumpai dalam proses penyusunan laporan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua Aamiin. Penulis mengharapkan saran dari pembaca agar dapat menjadi masukan bagi perbaikan di masa yang akan datang.

Gowa, Januari 2024



Andri Saputra

ABSTRAK

ANDRI SAPUTRA. Analisis Mineralogi, Geokimia dan Potensi Pembentukan Air Asam Tambang pada *Site* Tambang Bijih Besi di Daerah Tanjung Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan (dibimbing oleh **Muhammad Ramli, Sufriadin**)

Endapan bijih besi di Daerah Tanjung, Kabupaten Bone, Sulawesi Selatan berupa bijih yang berasosiasi dengan intrusi batuan beku terutama granodiorit beserta kuarsa sebagai hasil dari naiknya larutan sisa magma yang mengandung bijih besi. Keberadaan mineral sulfida yang berasosiasi dengan bijih besi dalam jumlah kecil, namun mineral tersebut terpapar oleh udara dan kontak langsung dengan air dalam waktu yang lebih lama dapat memicu pembentukan air asam tambang. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik mineralogi dan komposisi kimia bijih besi serta menganalisis potensi pembentukan air asam tambang pada tambang bijih besi. Sampel dianalisis dengan metode mikroskopis dan *x-ray diffraction* (XRD) untuk mengetahui tekstur dan jenis mineral penyusun bijih sedangkan analisis kimia *inductivity coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS) dan *inductivity coupled plasma optical emission spectrometry* (ICP-OES) untuk mengetahui komposisi *major oxide* (MO), *trace element* (TE), *rare earth element and yttrium* (REY). Uji kinetik *free draining column leach* (FDCL) untuk memprediksi laju reaksi pembentukan air asam tambang. Hasil analisis mikroskopis dan XRD menunjukkan adanya mineral magnetit, goetit, hematit, kuarsa, birnesit, pirit dan kalkopirit. Pirit dan kalkopirit merupakan pemicu terbentuknya air asam tambang. Hasil analisis kimia dengan metode ICP-MS dan ICP-OES menunjukkan *major oxide* kadar Fe_2O_3 yang sangat tinggi, *trace element* memperlihatkan pengayaan unsur As, Bi, Co, Cu, In, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, U, W dan Zn dan REY ditemukan 15 unsur tanah jarang, tetapi unsur-unsur ini ditemukan tidak adanya pengkayaan, hal ini dibuktikan dengan hasil normalisasi dan banyaknya konsentrasi unsur tanah jarang di kerak bumi dan hasil pengujian kinetik yang menunjukkan nilai pH 2,1-4,0 dalam kategori berpotensi terbentuk air asam tambang.

Kata Kunci : Mineralogi; Bijih Besi; REY; Air Asam Tambang; Geokimia.

ABSTRACT

ANDRI SAPUTRA. Mineralogical, Geochemical and Formation Potential Analysis of Acid Mine Drainage in Iron Ore Mines Site of the Tanjung Area, Bone District, South Sulawesi Province (guided by **Muhammad Ramli, Sufriadin**)

Iron ore deposits in Tanjung Area, Bone Regency, South Sulawesi in the form of ore associated with igneous rock intrusion, especially granodiorite and quartz as a result of rising magma residual solutions containing iron ore. The presence of sulfide minerals associated with iron ore in small quantities, but these minerals are exposed to air and direct contact with water for a longer time can trigger the formation of acid mine water. The purpose of this study is to analyze the mineralogical characteristics and chemical composition of iron ore and analyze the potential for acid mine water formation in iron ore mines. Samples were analyzed by microscopic methods and x-ray diffraction (XRD) to determine the texture and type of minerals constituent of ore while chemical analysis of inductivity coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and inductivity coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) to determine the composition of major oxide (MO), trace element (TE), rare earth element and yttrium (REY). Free draining column leach (FDCL) kinetic test to predict the reaction rate of acid mine water formation. The results of microscopic analysis and XRD showed the presence of magnetite, goethite, hematite, quartz, birnesite, pyrite and chalcopyrite minerals. Pyrite and chalcopyrite trigger the formation of acid mine water. The results of chemical analysis with the ICP-MS and ICP-OES methods showed very high levels of major oxide Fe_2O_3 , trace elements showed enrichment of As, Bi, Co, Cu, In, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, U, W and Zn and REY found 15 rare earth elements, but these elements were found to have no enrichment, this is evidenced by the results of normalization and the large concentration of rare earth elements in the earth's crust and kinetic test results that showed pH values of 2.1-4.0 in the category Potentially acid mine water is formed.

Keywords: Mineralogy; Iron Ore; REY; Acid Mine Drainage; Geochemistry.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.3.1 Tujuan Umum	3
1.3.2 Tujuan Khusus	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Geologi Regional	4
2.1.1 Geomorfologi	4
2.1.2 Stratigrafi.....	4
2.2. Air Asam Tambang.....	5
2.3. Pembentukan Air Asam Tambang	6
2.4. Sumber Air Asam Tambang	8
2.5. Pengelolaan Air Asam Tambang	8
2.5.1 Pendekatan Preventif.....	8
2.5.2 Pengolahan Aktif dan Pasif	9
2.6. Mineral Pembentuk Air Asam Tambang	11
2.7. Bijih Besi	12
2.8. Mineral Bijih (Mineral Logam)	12
2.9. Mineral-Mineral Pembawa Bijih Besi	13
2.10. Analisis Mineralogi	16

2.10.1 Analisis Mikroskopis (Mineragrafi).....	16
2.10.2 Analisis <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	17
2.11. Analisis Kimia Bijih.....	18
2.12. Uji Kinetik.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Lokasi Penelitian.....	21
3.2. Studi Literatur	21
3.3. Pekerjaan Lapangan	22
3.3.1 Pengambilan Sampel.....	22
3.3.2 Pengambilan Dokumentasi.....	22
3.4. Analisis Laboratorium	26
3.4.1 Analisis Mineralogi.....	26
3.4.2 Analisis Kimia.....	27
3.4.3 Uji Kinetik.....	28
3.5. Pengolahan Data	29
3.6. Bagan Alir Penelitian.....	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1. Kondisi Lapangan	32
4.2. Sampel <i>Stockpile</i>	33
4.2.1 Analisis Mikroskopis (Mineragrafi).....	33
4.2.2 Analisis <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	35
4.3. Komposisi Kimia Bijih Besi	37
4.3.1 Analisis ICP-MS dan ICP-OES	37
4.3.2 Analisis ICP-OES <i>Major Oxide</i>	38
4.3.3 Analisis ICP-MS <i>Trace Element</i>	39
4.3.4 <i>Rare Earth Yttrium</i> (REY)	44
4.4. Hasil Uji Kinetik.....	47
BAB V PENUTUP	56
5.1. Kesimpulan	56
5.2. Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN.....	61

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 1. Mineral sulfida pembentuk air asam tambang	11
Tabel 2. Hasil analisis <i>major oxide</i>	38
Tabel 3. Konsentrasi unsur jejak di kerak bumi.....	39
Tabel 4. Komposisi unsur jejak sampel yang di normalisasi terhadap <i>upper continental crust</i>	40
Tabel 5. Konsentrasi unsur tanah jarang di kerak bumi	45
Tabel 6. Komposisi unsur tanah jarang sampel yang di normalisasi terhadap <i>upper continental crust</i>	44
Tabel 7. Pengujian kinetik <i>free draining column leach</i> (FDCL)	47
Tabel 8. Hasil pengujian kinetik sampel ST-1A	48
Tabel 9. Hasil pengujian kinetik sampel ST-1B.....	49
Tabel 10. Hasil pengujian kinetik sampel ST-1C.....	50
Tabel 11. Hasil pengujian kinetik sampel ST-2A	51
Tabel 12. Hasil pengujian kinetik sampel ST-2B.....	52
Tabel 13. Hasil pengujian kinetik sampel ST-2C.....	53

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 1. Pemilihan pengolahan AAT	9
Gambar 2. Mineral magnetit (mag) berasosiasi dengan pirit (py).....	14
Gambar 3. Mineral hematit (hm) berasosiasi dengan pirit (py) dan kalkopirit (cp)	15
Gambar 4. Mineral goetit	16
Gambar 5. Prinsip kerja <i>x-ray diffraction</i> (XRD).	18
Gambar 6. Pengujian kinetik metode FDCL	20
Gambar 7. Peta tunjuk lokasi penelitian.....	21
Gambar 8. <i>Stockpile</i> yang sudah dilakukan peremukan.....	22
Gambar 9. <i>Stockpile</i> yang belum dilakukan peremukan	23
Gambar 10. Sampel ST-1A (sampel bawah <i>stockpile</i>).....	23
Gambar 11. Sampel ST-1B (sampel tengah <i>stockpile</i>).....	24
Gambar 12. Sampel ST-1C (sampel atas <i>stockpile</i>)	24
Gambar 13. Sampel ST-2A (sampel bawa <i>stockpile</i>).....	25
Gambar 14. Sampel ST-2B (sampel tengah <i>stockpile</i>).....	25
Gambar 15. Sampel ST-2C (sampel atas <i>stockpile</i>)	26
Gambar 16. Pengujian kinetik metode <i>free draining column leach</i>	28
Gambar 17. Diagram alir penelitian	31
Gambar 18. <i>Stockpile</i> (A) sudah dilakukan peremukan dan <i>stockpile</i> (B) belum dilakukan peremukan.....	32
Gambar 19. Aliran air dari <i>stockpile</i>	33
Gambar 20. (A) Fotomikrograf sayatan yang dipoles menunjukkan mineral oksida goetit (goe) dan sulfida pirit (py) (B) fotomikrograf sayatan yang dipoles menunjukkan mineral oksida goetit (goe) dan hematit (hem).....	34
Gambar 21. (A) fotomikrograf sayatan yang dipoles menunjukkan mineral sulfida kalkopirit (ccp) (B) fotomikrograf sayatan yang dipoles menunjukkan mineral oksida goetit (goe) dan hematit (hem), mineral sulfida kalkopirit menggantikan	

mineral goetit (goe).	34
Gambar 22. Diffraktogram sampel ST.01.	36
Gambar 23. Diffraktogram sampel ST.02.	37
Gambar 24. Pengayaan <i>trace element</i> sampel <i>stockpile</i> 1.....	41
Gambar 25. Pengayaan <i>trace element</i> sampel <i>stockpile</i> 2.....	42
Gambar 26. Grafik perilaku pengayaan <i>trace element stockpile</i> 1 dan <i>stockpile</i> 2.....	43
Gambar 27. Grafik <i>rare earth yttrium</i> (REY)	46
Gambar 28. Grafik hasil pengujian kinetik sampel ST-1A	48
Gambar 29. Grafik hasil pengujian kinetik sampel ST-1B	49
Gambar 30. Grafik hasil pengujian kinetik sampel ST-1C	50
Gambar 31. Grafik hasil pengujian kinetik sampel ST-2A	51
Gambar 32. Grafik hasil pengujian kinetik sampel ST-2B	52
Gambar 33. Grafik hasil pengujian kinetik sampel ST-2C	53
Gambar 34. Grafik hasil uji kinetik sampel <i>stockpile</i> 1 dan <i>stockpile</i> 2 periode harian	54

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor		Halaman
Lampiran 1	Peta lokasi pengambilan sampel	61
Lampiran 2.	Analisis mikroskopis (mineragrafi).....	63
Lampiran 3.	Analisis <i>x-ray diffraction</i> (XRD)	66
Lampiran 4.	Analisis ICP-MS dan ICP-OES	78
Lampiran 5.	Pengujian kinetik <i>free draining column leach</i> (FDCL)	99

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang dan Singkatan		Arti dan Keterangan
AAT	=	Air asam tambang
LREE	=	<i>Light rare earth elements</i>
AMD	=	<i>Acid mine drinage</i>
HREE	=	<i>Heavy rare earth elements</i>
FDCL	=	<i>Free draining coloum leach</i>
ICP-MS	=	<i>Inductivity coupled plasma mass spectrometry</i>
ICP-OES	=	<i>Inductivity coupled plasma optical emission spectrometry</i>
REY	=	<i>Rare eart yttrium</i>
TE	=	<i>Trace element</i>
MO	=	<i>Major oxide</i>
pH	=	<i>Potential of hidrogen</i>
REE	=	<i>Rare earth elements</i>
XRD	=	<i>X-ray diffractrion</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keberadaan bijih besi di Indonesia dapat ditemukan di beberapa daerah dengan jumlah sumberdaya yang beragam, salah satu daerah yang memiliki potensi keterdapatan endapan bijih besi adalah Daerah Tanjung Kabupaten Bone Sulawesi Selatan. Endapan bijih besi yang terdapat di Daerah Tanjung Kabupaten Bone Sulawesi Selatan pernah dilakukan penelitian oleh beberapa peneliti sebelumnya dan salah satunya mendapatkan hasil bahwa daerah tersebut berupa bongkah-bongkah yang berasosiasi dengan intrusi. Daerah prospek dijumpai di Dusun Tanjung (Utoyo, 2008).

Air asam tambang (AAT) adalah salah satu masalah utama yang muncul akibat penambangan terbuka terutama penambangan bijih besi dan mineral sulfida. Kegiatan penambangan terbuka dan pengolahan mineral juga menghasilkan batuan sisa dan tailing dalam jumlah besar (Elghali *et al.*, 2018) material ini biasanya mengandung mineral sulfida dalam jumlah signifikan sebagai fase penghasil asam terutama pirit dan kalkopirit. Paparan udara terhadap mineral sulfida dan kontak dengan air telah menyebabkan terbentuknya air asam tambang (Plante *et al.*, 2021). Laju oksidasi mineral sulfida dapat dikendalikan oleh karakteristik mineralogi, suhu, konsentrasi oksigen terlarut, pH, aktivitas kimia besi, dan spesies mikroba pengoksidasi (Becker *et al.*, 2015; Elghali *et al.*, 2018). Karakteristik mineralogi yang mempengaruhi laju oksidasi pirit sebagai penghasil utama air asam tambang (Lottermosher, 2010) seperti faktor berikut: tekstur mineral pirit (ukuran partikel, porositas dan luas permukaan), kristalografi pirit, dan substitusi elemen jejak. Kristal pirit berbutir halus dengan luas permukaan yang besar meningkatkan reaktivitas. Pirit framboidal dengan partikel kecil akan lebih reaktif daripada pirit euhedral atau nodul pirit kasar. Kristal pirit dengan cacat struktural memiliki kisi kristal yang terdistorsi. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan kerentanan terhadap serangan kimia. Pirit juga dapat mengakomodasi beberapa unsur jejak seperti As, Cd, Co, Hg, Pb, Sb, Se di dalam strukturnya baik melalui substitusi atau adsorpsi permukaan yang menyebabkan berkurangnya ketahanannya terhadap oksidasi.

Endapan bijih besi di Daerah Tanjung, Kabupaten Bone, Sulawesi Selatan berupa bijih yang berasosiasi dengan intrusi batuan beku terutama granodiorit dan pegmatit granodiorit beserta kuarsa sebagai hasil dari naiknya larutan sisa magma yang mengandung bijih besi (Utoyo, 2008). Mineralogi bijih yang dipelajari menunjukkan magnetit merupakan fase dominan yang diikuti oleh hematit dan goetit. Pirit hadir dalam jumlah kecil dan terjadi sebagai inklusi dalam magnetit sebagai bahan pengisi rekahan (Firdaus *et al.*, 2020; Bakri *et al.*, 2021). Keberadaan mineral sulfida yang terdapat pada bijih besi dan mineral tersebut terpapar oleh oksigen dan kontak langsung dengan air dalam waktu yang lebih lama dapat memicu pembentukan air asam tambang.

Berdasarkan uraian tersebut maka dilakukan penelitian pada endapan bijih besi untuk mengetahui potensi pembentukan air asam tambang yang dapat ditimbulkan oleh adanya tumpukan bijih besi pada lokasi bekas penambangan. Hasil prediksi potensi pembentukan air asam tambang ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam desain penambangan dan upaya pengelolaan lingkungan untuk meminimalisasi dampak lingkungan yang tidak diinginkan. Salah satu daerah tambang bijih besi terletak di Daerah Tanjung Kecamatan Bontocani merupakan penambangan yang sudah lama ditinggalkan, sehingga analisis sampel dilakukan untuk mengetahui karakteristik mineralogi, komposisi kimia bijih dan menganalisis perubahan tingkat keasaman batuan terhadap waktu penyiraman pada *stockpile* bijih besi di Daerah Tanjung.

1.2 Rumusan Masalah

Daerah penelitian terdapat di Dusun Tanjung Kecamatan Bontocani Kabupaten Bone, dimana banyak di jumpai batuan basal dan bijih besi. Hadirnya batuan tersebut berpotensi mengandung mineral sulfida yang tinggi dimana mineral tersebut merupakan salah satu rantai dari proses pembentukan air asam tambang. Berdasarkan hal tersebut permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini yaitu karakteristik mineralogi dan komposisi kimia serta menganalisis potensi pembentukan air asam tambang.

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk memprediksi potensi pembentukan air asam pada bekas tambang bijih besi di Daerah Tanjung.

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Menganalisis karakteristik mineralogi bijih besi pada *stockpile* di Daerah Tanjung.
2. Menganalisis karakteristik kimia bijih besi pada *stockpile* di Daerah Tanjung.
3. Menganalisis perubahan tingkat keasaman batuan terhadap waktu penyiraman pada *stockpile* bijih besi di Daerah Tanjung.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah agar dapat menjadi salah satu bahan referensi untuk peneliti selanjutnya dan memberikan informasi tentang karakteristik mineralogi, geokimia dan pembentukan air asam pada endapan bijih besi yang berada di Daerah Tanjung.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini yaitu berfokus menganalisis karakteristik mineralogi dan menganalisis karaktersitik kimia serta berfokus menganalisis potensi pembentuk air asam tambang pada *stockpile* bijih besi di Daerah Tanjung.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Geologi Regional Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat, Sulawesi Selatan meliputi Daerah Kabupaten Maros, Pangkep, Barru, Watansoppeng, Wajo, Watampone, Sinjai dan Kotamadya Parepare, semuanya termasuk Daerah Provinsi Sulawesi Selatan. Lembar peta berbatasan dengan Lembar Majene-Palopo di utara, Lembar Ujung Pandang, Benteng dan Sinjai di Selatan, Selat Makasar di Barat dan, Teluk Bone di Timur (Sukamto, 1982).

2.1.1 Geomorfologi

Di Daerah Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat terdapat dua baris pegunungan yang memanjang hampir sejajar pada arah utara-barat laut dan terpisahkan oleh lembah Sungai Walanae. Pegunungan yang barat menempati hampir setengah luas daerah, melebar di bagian selatan (50 km) dan menyempit di bagian utara (22 km). Puncak tertingginya 1694 m, sedangkan ketinggian rata-ratanya 1500 m. Pembentuknya sebagian besar batuan gunungapi, di lereng barat dan di beberapa tempat pada lereng timur terdapat topografi *karst*, penceminan adanya batugamping diantara topografi *karst* di lereng barat terdapat daerah pebukitan yang dibentuk oleh batuan Pra-Tersier. Pegunungan ini di baratdaya dibatasi oleh dataran Pangkajene-Maros sebagai lanjutan dari dataran di selatannya (Sukamto, 1982).

2.1.2 Stratigrafi

Kelompok batuan tua yang umurnya belum diketahui terdiri dari batuan ularabasa, batuan malihan dan batuan melange. Batuannya terbreksikan dan tergerus sentuhannya dengan formasi di sekitarnya berupa sesar atau ketidselarasan. Penarikan radiometri pada sekis yang menghasilkan 111 juta tahun kemungkinan menunjukkan peristiwa malihan akhir pada tektonik Zaman Kapur. Batuan tua ini tertindih tak selaras oleh endapan *flysch* Formasi Balangbaru dan Formasi Marada yang tebalnya lebih dari 2000 m dan berumur Kapur Akhir. Kegiatan magma sudah mulai pada waktu itu dengan bukti adanya sisipan lava dalam *flysch*. Batuan gunungapi berumur Paleosen (58,5- 63,0 jt), dan diendapkan

dalam lingkungan laut, menindih tak selaras batuan *flysch* yang berumur Kapur Akhir. Terobosan batuan beku yang terjadi di daerah itu semuanya berkaitan erat dengan kegiatan gunungapi tersebut. Bentuknya berupa stok, sill, bersusunan beraneka dari basal, andesit, trakit, diorit dan granodiorit dan berumur berkisar dari 8.3 sampai 19 ± 2 juta tahun.

Formasi Salo Kalupang: batupasir, serpih dan batulempung berselingan dengan konglomerat gunungapi, breksi dan tufa bersisipan lava, batugamping dan napal, batulempung, serpih dan batupasir di beberapa tempat terciakan oleh warna merah, coklat, kelabu dan hitam, mengandung fosil moluska dan foraminifera, terutama di dalam lapisan batugamping dan napal pada umumnya gampingan padat dan sebagian dengan urat kalsit, sebagian serpihnya sabakan, kebanyakan lapisan terlipat dengan kemiringan antara 20° - 57° . Penampang di Salo Kalupang memperlihatkan lebih banyak konglomerat di bagian barat, dengan komponen andesit dan basal. Di sebelah timur Palatae tersingkap lebih banyak tufa dan batupasir daripada di Salo Kalupang. Di timur Samaenre terdapat lebih banyak singkapan serpih daripada di tempat lain; batuanannya berwarna coklat kemerahan dan kelabu berselingan dengan batugamping berlapis (Teol) dan batupasir.

Formasi Batuan Gunungapi Kalamiseng: lava dan breksi, dengan sisipan tufa, batupasir, batulempung dan napal; kebanyakan bersusunan basal dan sebagian andesit; kelabu tua hingga kelabu kehitaman, umumnya kebanyakan terubah, amidaloid dengan mineral sekunder karbonat dan silikat; sebagian lavanya menunjukkan struktur bantal. Satuan batuan ini tersingkap di sepanjang daerah pegunungan di timur lembah Walanae, terpisahkan oleh lajur sesar dari batuan sedimen dan karbonat yang berumur Eosen di bagian baratnya diterobos oleh retas dan stok basal, andesit dan diorit. Satuan batuan ini berumur lebih muda dari batugamping Eosen dan lebih tua dari Formasi Camba Miosen Tengah, mungkin Miosen Bawah; dan tebalnya tidak kurang dari 4.250 m (Sukanto, 1982).

2.2 Air Asam Tambang

Air asam tambang secara umum digambarkan sebagai yang paling signifikan ancaman terhadap lingkungan. Pembentuk asam dan pelarutan logam adalah yang utama permasalahan yang berkaitan dengan pencemaran dari kegiatan

pertambangan. Dampak pertambangan terhadap lingkungan meliputi pelepasan banyak kontaminan kimia ke dalam air sumber daya mengubahnya menjadi asam yang disebut air asam tambang. Air asam tambang adalah air kaya logam yang terbentuk dari bahan kimia reaksi antara air dan batuan yang mengandung sulfur, mengandung mineral. Limpasan yang terbentuk biasanya bersifat asam dan sering kali berasal dari daerah tempat penambangan bijih atau batubara. Kegiatan tersebut telah mengungkap batuan yang mengandung mineral sulfida seperti pirit (Ochieng *et al.*, 2010).

Air asam tambang (AAT) juga didefinisikan sebagai air asam yang terbentuk di bawah tanah ketika lubang-lubang tambang tua terisi dengan air, yang teroksidasi dengan mineral sulfida kemudian terpapar matahari yang menyebabkan air asam tambang (Guedes, 2010).

Air asam tambang (AAT) merupakan air dengan pH yang rendah dan kelarutan logam yang tinggi sebagai akibat dari adanya reaksi antara mineral sulfida yang tersingkap karena kegiatan penggalian oksigen, dan air. Di pertambangan terbuka, AAT berpotensi untuk terbentuk di area penambangan aktif dan disposal. Keberadaan AAT di lingkungan terutama air permukaan maupun air tanah berpotensi memberikan dampak terhadap terganggunya kualitas dan habitat lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengelolaan AAT yang baik untuk mencegah dan mengolah AAT agar memenuhi standar kualitas lingkungan sebelum dialirkan ke badan air penerima (Gunawan *et al.*, 2015).

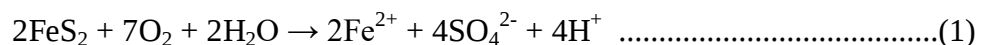
2.3 Pembentukan Air Asam Tambang

Bahan buangan (*disposal*) tambang yang berpotensi menghasilkan asam berasal dari lapisan batuan penutup atau batubara atau bijih mineral yang mengandung mineral-mineral sulfida, terutama pirit (FeS_2). Material tersebut terdedah (*exposed*) ke kondisi oksidatif, sebagai konsekuensi dari penambangan dan pemrosesan bijih logam dan batubara (Johnson & Hallberg, 2005) maka mineral-mineral tersebut teroksidasi akibat adanya air dan udara membentuk larutan sangat masam yang kaya sulfat dan besi larut, yang kemudian mengalir sebagai air yang disebut dengan air asam tambang (AAT) (Munawar, 2017).

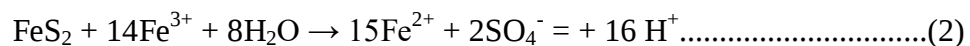
Pembentukan asam dapat berlangsung selama berminggu-minggu, berbulan-bulan, atau bahkan berabad-abad sampai dengan semua mineral sulfida benar-benar habis teroksidasi dan batuananya menjadi lembam (*inert*), atau telah dilakukan pengelolaan limbah secara khusus atau langkah-langkah pengendalian AAT (Munawar, 2017).

1. Reaksi pembentukan air asam tambang

Oksidasi pirit merupakan rangkaian reaksi biologi dan elektrokimia, oleh pH, PO₂, permukaan spesifik, morfologi, kehadiran dari bakteri dan mineral batulempung serta faktor hidrologi. Proses terbentuknya AAT terdiri dari beberapa tahapan reaksi. Reaksi pertama adalah reaksi oksidasi mineral pirit dengan kehadiran air dan oksigen. Pada reaksi tersebut Fe²⁺ diperoleh dari proses penguraian pirit atau proses oksidasi pirit oleh oksigen. Reaksi tersebut merupakan reaksi pelapukan diikuti dengan proses oksidasi pirit dan memperoleh dua mol keasaman dari setiap mol pirit yang teroksidasi. Reaksi tersebut dapat berlangsung baik pada kondisi abiotik maupun biotik.



Reaksi selanjutnya adalah oksidasi pirit oleh ion *ferri*. Reaksi tersebut lebih cepat dua sampai tiga kali dibandingkan dengan oksidasi oleh oksigen. Jumlah mol keasaman juga lebih banyak per mol pirit. Akan tetapi, reaksi ini hanya berlangsung selama ion *ferri* cukup tersedia atau kondisi asam.

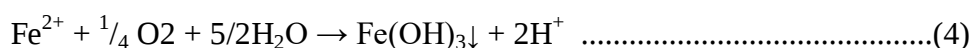


Dengan demikian proses reaksi oksidasi pirit dimulai dengan reaksi (1) pada kondisi dekat netral dan dilanjutkan dengan reaksi (2) jika kondisi lebih cepat dari pH lebih kecil dari 4,5. Pada pH rendah (lebih kecil dari 4,5) Fe³⁺ akan lebih cepat mengoksidasi pirit dibandingkan O₂ dan lebih cepat pula dari pada O₂ mengoksidasi Fe₂₊ (Nordstrom, 1982). Oleh karena itu, reaksi (2) dikenal sebagai langkah pembatas laju oksidasi pirit. Ion *ferri* terbentuknya hasil reaksi ion *ferro* yang ditunjukkan pada reaksi (1) dan konsumsi satu mol keasaman seperti yang tahan pada reaksi (3) Laju reaksi

ini pada pH <5 dan kondisi abiotik. Kehadiran bakteri *acidithiobacillus ferrooxidans* akan mempercepat laju oksidasi Fe^{2+} sampai 5 sampai 6 kali.



Dari reaksi (3) terlihat bahwa untuk mengoksidasi ion *ferro* menjadi *ferri* diperlukan kehadiran oksigen. Ion *ferri* dapat mengalami oksidasi dan hidrolisa sehingga membentuk *ferri* hidroksida seperti yang ditunjukkan pada reaksi (4). Pembentukan presipitat atau endapan *ferri* hidroksida yang berwarna coklat kekuningan dan sering disebut *yellowboy* sangat tergantung pada pH, yaitu lebih banyak pada pH di atas 3,5.



Reaksi (4) reaksi pelarutan pengendapan yang *reversibel* dan sedang sampai pH sama dengan 3 dan merupakan sumber atau dikurangnya Fe^{3+} serta merupakan langkah penting dalam melepaskan asam ke lingkungan (Gautama, 2014).

2.4 Sumber Air Asam Tambang

Proses pertambangan, mulai dari pembongkaran dan pengerukan lapisan batuan penutup dan pengolahan bahan tambang (batubara maupun bijih metal/mineral) dan pembuangan limbahnya, ada kemungkinan bahan-bahan yang berpotensi membentuk AAT tersebar dan berada di beberapa lokasi dalam lingkungan tambang. Pengetahuan keberadaan bahan-bahan tersebut penting dalam upaya asesmen beban yang diakibatkan oleh kemasaman dan logam-logam terkandung di dalam AAT dan pengelolaannya (Munawar, 2017).

2.5 Pengelolaan Air Asam Tambang

Pengelolaan AAT yang terbaik adalah dengan cara mencegah atau menghentikan pembentukan AAT itu sendiri, maka dilakukan AAT dapat dilakukan secara pendekatan preventif dan pengolahan aktif.

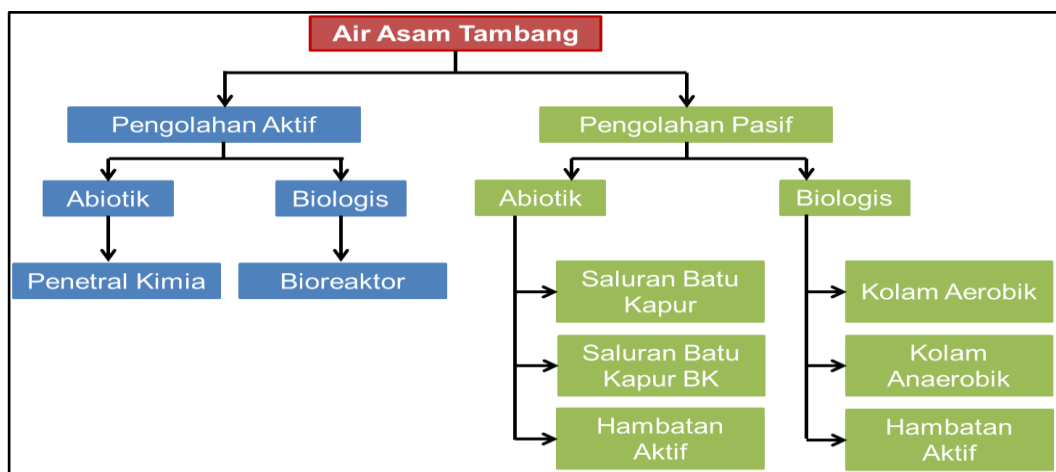
2.5.1 Pendekatan Preventif

Teknik preventif yang sudah banyak diteliti dan diterapkan pada umumnya mendasarkan kepada tiga mekanisme atau prinsip, yaitu;

1. Pencegahan terjadinya reaksi-reaksi pembentukan asam secara kimiawi.
2. Penghambatan pertumbuhan jasad renik yang bertindak sebagai katalisator reaksi pembentukan asam.
3. Perlakuan secara fisik atau geoteknik untuk meminimalkan kontak antara bahan berpotensi membentuk asam (mengandung pirit) dengan air dan udara, dan pelindian di bawah ini secara singkat dibahas beberapa teknik preventif yang sudah diterapkan dalam pengelolaan bahan disposal tambang untuk mencegah, mengurangi atau menghambat pembentukan AAT.

2.5.2 Pengolahan Aktif dan Pasif

Pengolahan yang paling umum digunakan adalah dengan metode mengolah debit air asam tambang dengan pengolahan aktif dimana pengolahan menggunakan kimia penetral yang ditambahkan terus menerus ke air asam tambang (Johnson and Hallberg, 2005). Proses penetralan air asam tambang ini akan mengendapkan logam-logam terlarut dan akan membentuk selimut lumpur (*sludge blanket*). Kelemahan dari pengolahan aktif ini adalah memerlukan biaya yang besar dan memindahkan atau membuang selimut lumpur yang mengandung logam. Pemilihan metode pasif dalam pengolahan air asam tambang dibandingkan dengan pengolahan secara aktif mempunyai kelebihan terutama dari segi perawatan dan biaya yang lebih rendah. Sistem pengolahan pasif hanya memerlukan perawatan dan penggantian secara periodik. Gambar 1 memperlihatkan beberapa alternatif pemilihan pengolahan air asam tambang.



Gambar 1 Pemilihan pengolahan AAT (Johnson and Hallberg, 2005).

Kelemahan dari pengolahan aktif ini adalah memerlukan biaya yang besar dan memindahkan atau membuang selimut lumpur yang mengandung logam, sedangkan pengolahan pasif yang biasa dilakukan adalah sistem SAPS (*Successive Alkalinity Producing System*). Kelemahan dari pengolahan pasif adalah menyebabkan terjadinya peningkatan pH dan reduksi logam sehingga perlu dikembangkan alternatif pengolahan lain, salah satunya adalah menggunakan penyerapan. *Successive alkalinity producing system* (SAPS) merupakan salah satu metode pengolahan pasif air asam tambang yang terdiri atas lapisan bahan organik dan batu kapur. Keduanya disusun secara vertikal dengan ketebalan tertentu. Air asam tambang yang diolah akan mengalir secara vertikal ke dalam sistem berdasarkan tekanan gravitasi hidrolik. Sistem SAPS terdapat dua proses utama yang menyebabkan terjadinya peningkatan pH dan reduksi logam, yakni larutnya batu kapur dan reduksi sulfat secara biologis. Kedua proses ini menghasilkan alkalinitas dalam bentuk bikarbonat sebagai senyawa penetral. Lapisan bahan organik yang umum digunakan adalah komposisi produk organik sisa yang biasanya dari industri perkebangan jamur yang disebut dengan *spent mushroom substrat* (SMS). SMS merupakan material organik yang bersifat heterogen yang mengandung serbuk gergaji, kotoran hewan, dedak dan *gypsum*. Sistem pengelolaan pasif yang menjadi penyebab meningkatnya pH ada 2 proses utama, meliputi batu gamping larut, serta sulfat tereduksi secara biologis. Dua proses tersebut membawa hasil berupa alkalinitas yang berbentuk HCO_3 (bikarbonat) sebagai senyawa yang bersifat netral untuk mendalami proses tersebut, berikut paparan mekanisme yang memengaruhi penurunan pada logam terlarut (Johnson and Hallberg, 2005).

1. Logam dapat mengendap akibat terjadinya proses *hydrolysis* dan oksidasi.
2. Khusus bahan organik seperti kompos, adsorpsi logam memiliki potensi tinggi untuk terjadi.
3. Adanya interaksi antara S^{2-} (*sulfide*) yang dihasilkan melalui proses sulfat yang tereduksi bersamaan dengan logam yang memiliki jumlah valensi 2 (misalnya Fe^{2+} serta Mn^{2+}) sehingga menghasilkan bentuk baru dari endapan logam sulfida.

4. Adanya biosorpsi logam yang dilakukan oleh mikroorganisme dan vegetasi tumbuhan air. Contoh mikroorganisme yang melakukan biosorpsi logam seperti fungi, bakteri, serta alga yang bisa tumbuh di atas lapisan atau permukaan bahan organik.

Secara praktik, metode pasif terbukti mampu meningkatkan dan memperbaiki kualitas dari air asam tambang, khususnya ketika menerapkan teknologi *wetland*. Seperti keajaiban, *flora* dan *fauna* seperti katak, serangga, dan ikan bisa menempati lingkungan baru yang dihasilkan oleh *wetland*.

2.6 Mineral Pembentuk Air Asam Tambang

Sumber pembentuk air asam tambang yang utama adalah mineral sulfida reaktif beserta produk oksidasinya terdapat banyak jenis mineral sulfida di bumi namun mineral sulfida pembentuk AAT paling utama adalah pirit (FeS_2) (Gautama, 2014). Berbagai mineral sulfida yang ditemukan pada cebakan bijih dan berpotensi membentuk asam dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Mineral sulfida pembentuk air asam tambang (Gautama, 2014).

Mineral	Rumus Kimia
Mineral sulfida besi pembentuk air asam	
Pirit (<i>pyrite</i>), Markasit (<i>marcasite</i>)	FeS_2
Pirotit (<i>pyrrhotite</i>)	Fe_{1-x}S
Melnikovit (<i>melnikovite</i>)	Fe_3S_4
Arsenopirit (<i>arsenopyrite</i>)	FeAsS
Violarit (<i>violarite</i>)	FeNi_2S_4
Makinawit (<i>makinauwite</i>)	$(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$
Mineral sulfida tembaga pembentuk air asam	
Kovelit (<i>covelite</i>)	CuS
Kalkosit (<i>chalcocite</i>)	Cu_2S
Kalkopirit (<i>chalcopyrite</i>)	CuFeS_2
Kubanit (<i>cubinite</i>)	CuFe_2S_3
Bornit (<i>bornite</i>)	CuFeS_4
Enargit (<i>enargite</i>)	Cu_3AsS_4
Tenantit (<i>tennantite</i>)	$(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Tetrahendrit (<i>tetrahendrite</i>)	$(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$

Pembentukan air asam tambang dimungkinkan karena tersedianya mineral sulfida, oksigen (dalam udara) sebagai pengoksidasi dan air. Reaksi pertama adalah reaksi pelapukan dari pirit disertai proses oksidasi. Pirit dioksidasi menjadi sulfat dan besi, dari reaksi ini dihasilkan dua mol keasaman dari setiap mol pirit

yang teroksidasi. O_2 terlarut dapat juga mengoksidasi tetapi kurang penting karena kelarutannya sangat terbatas. Reaksi ini dapat terjadi baik pada kondisi abiotik maupun biotik (Ranton, 1982).

2.7 Bijih Besi

Besi merupakan logam kedua yang paling banyak di bumi ini. Karakter dari endapan besi ini bisa berupa endapan logam yang berdiri sendiri namun seringkali ditemukan berasosiasi dengan mineral logam lainnya, biasanya besi terdapat sebagai kandungan logam tanah (residual), namun jarang yang memiliki nilai ekonomis tinggi (Prabowo, 2011). Bijih besi adalah mineral bernilai ekonomis terbesar kedua yang tercatat di dunia. Ketika ditambang, bijih besi ini sering dikaitkan dengan logam besi lainnya seperti magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), limonit ($FeO(OH).nH_2O$), siderit ($FeCO_3$), pirit (FeS_2), pirotit ($Fe_{(1-x)}S$), markasit (FeS_2) dan mamosite (Fe^{2++end}) (Reimold *et al.*, 2005). Mineral ini memiliki permintaan yang tinggi di pasar dunia. Proses penambangan dan peleburan telah berlangsung sejak tahun 5500 yaitu pada era Mesopotamia (Moorey, 1982).

Teknologi pelayaran berkembang pesat (Wilson, 2011) yang memungkinkan komunikasi antara peradaban awal terjadi dengan cepat, teknologi pertambangan dan peleburan besi ini menyebar di antara peradaban yang memiliki nilai ekonomis. Kerajaan Kedah kuno, yang terletak di tengah-tengah jalur perdagangan dunia, juga menerima dampaknya ketika mulai terlibat dalam industri peleburan besi sejak 788 Abad SM (Mokhtar *and* Saidin, 2018; Mokhtar *and* SB2A, 2019).

2.8 Mineral Bijih (Mineral Logam)

Mineral bijih merupakan mineral-mineral yang bernilai ekonomis, mengandung unsur logam dan dapat diekstrak untuk kepentingan umat manusia. Mineral industri adalah semua batuan, mineral atau substansi yang terbentuk secara alami yang bernilai ekonomis, tidak termasuk di dalamnya adalah bijih logam, mineral, mineral *fuels* dan batumulia (Evans, 1993). Batasan mineral bijih dengan mineral opak, mineral penyerta sering membingungkan, pada kenyataannya sebagian besar mineral bijih tidak tembus cahaya (opak), sedangkan mineral penyerta merupakan mineral-mineral yang tembus cahaya (transparan). Bahan

mineral bijih harus dapat di ekstrak logamnya, misalnya kalkopirit dapat di ekstrak tembaga. Walaupun suatu mineral mengandung unsur logam, tetapi kalau tidak dapat diekstrak, maka tidak dikategorikan sebagai mineral bijih. Beberapa pengarang menggunakan istilah mineral bijih sebagai sinonim mineral opak, karena istilah tersebut bisa mencakup mineral-mineral seperti pirit maupun pirhotit yang tidak bermamfaat tetapi hampir selalu ada endapan bijih (Evans, 1993). Penamaan mineral bijih terkait dengan keekonomian mineral, sedangkan penamaan mineral opak terkait dengan sifat mineral terhadap ketembusan cahaya.

2.9 Mineral-Mineral Pembawa Bijih Besi

Endapan mineral (mineral deposits) merupakan konsentrasi suatu mineral pada kerak bumi, terbentuk secara alami serta pada daerah yang terbatas, jadi apapun macam mineralnya dan bagaimana proses terkonsentrasinya, semuanya disebut endapan mineral. Mineral-mineral yang terkonsentrasi mengandung bahan atau material yang bernilai bagi manusia serta layak untuk ditambang, maka endapan tersebut secara khusus disebut endapan bijih (*ore deposits*) *ore* atau bijih diartikan sebagai kumpulan batuan mineral yang mengandung logam bernilai ekonomis yang konsentrasinya lebih tinggi daripada konsentrasi rata-rata pada kerak bumi sehingga dapat diambil nilai ekonomisnya (Evans, 1993). Bijih besi dibagi menjadi beberapa golongan diantaranya golongan oksida, sulfida dan hidroksida. Golongan oksida meliputi hematit dan magnetit sedangkan untuk golongan sulfida seperti pirit, kalkopirit, arsenopirit dan pirotit. Limonit dan goetit termasuk ke dalam golongan hidroksida. Berikut beberapa mineral-mineral pembawa bijih besi.

1. Magnetit merupakan kelompok mineral oksida dan hidroksida, berwarna abu-abu sampai hitam dengan kekerasan 5,5 - 6,5 (Cabri, 2016) dengan tingkat kemagnetan yang tinggi. Mineral magnetit merupakan mineral yang umum dijumpai pada batuan beku mafik dan ultramafik terbentuk pada suhu 600°-400°C (Yao *et al.*, 2015). Mineral magnetit memiliki tingkat kandungan Fe. Biasanya mineral magnetit berasosiasi dengan mineral hematit. Mineral magnetit terbentuk

hampir disemua tipe endapan bijih besi (Roonwal, 2018). Mineral magnetit dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Mineral magnetit (mag) berasosiasi dengan pirit (py) (Zhou *et al.*, 2017).

2. Hematit juga merupakan mineral golongan oksida dan hidroksida dengan sistem kristal hexagonal dan memiliki warna kemerahan sampai coklat, dengan kekerasan 5,5 –6,5 (Cabri, 2016). Hematit banyak ditemukan sebagai mineral primer dan juga sebagai produk alterasi dalam batuan beku dan metamorf terbentuk pada suhu 200°-130°C (Lu *et al.*, 2018). Mineral hematit dapat terbentuk pada fase differensiasi magma ataupun presipitasi dari larutan hidrothermal yang bergerak melalui rekahan batuan (Roonwal, 2018).



Gambar 3 Mineral hematit (hm) berasosiasi dengan pirit (py) dan kalkopirit (cp) (Zhou *et al.*, 2017).

3. Goetit merupakan mineral golongan oksida dan hidroksida dengan sistem kristal orthorombik dengan kekerasan 5-5,5. Goetit merupakan salah satu mineral terbentuk dari adanya proses alterasi endapan pembawa bijih besi. Mineral goetit juga kadang terbentuk dari hasil oksidasi yang tinggi dari mineral sulfida (Clout & Manuel, 2015). Goetit umumnya memiliki kadar Fe sebesar 63% dan sulit untuk diolah secara komersial dan berasosiasi dengan mineral hematit dan pirit (Roonwal, 2018).



Gambar 4 Mineral goetit (Zhou *et al*, 2017).

2.10 Analisis Mineralogi

Analisis Mineralogi merupakan metode analisis yang efektif dalam mendeskripsi batuan dan suatu senyawa kimia tertentu dalam wujud padat karena proses preparasinya mudah.

2.10.1 Analisis Mikroskopis (mineragrafi)

Analisis mineragrafi bertujuan untuk mendeskripsi tekstur dan kumpulan mineral bijih (*ore minerals*) dengan menggunakan mikroskop refleksi baik pada batuan sampling maupun urat kuarsa yang mengandung mineral opak (sulfida/oksida). Analisis mineragrafi conto batuan perlu dibuat preparat yang sesuai agar analisis dapat dilaksanakan mendekati sempurna. Preparat yang digunakan dalam analisis mineragrafi adalah sayatan poles. Sayatan poles adalah conto batuan yang diratakan salah satu permukaannya atau lebih, kemudian dibuat cetakan dengan menggunakan *transoptic powder*. Analisis mineragrafi dilakukan untuk mengetahui jenis mineral bijih pada batuan yang tidak terlihat oleh mikroskop polarisasi. Tujuan analisis ini untuk mengetahui tekstur, jenis dan

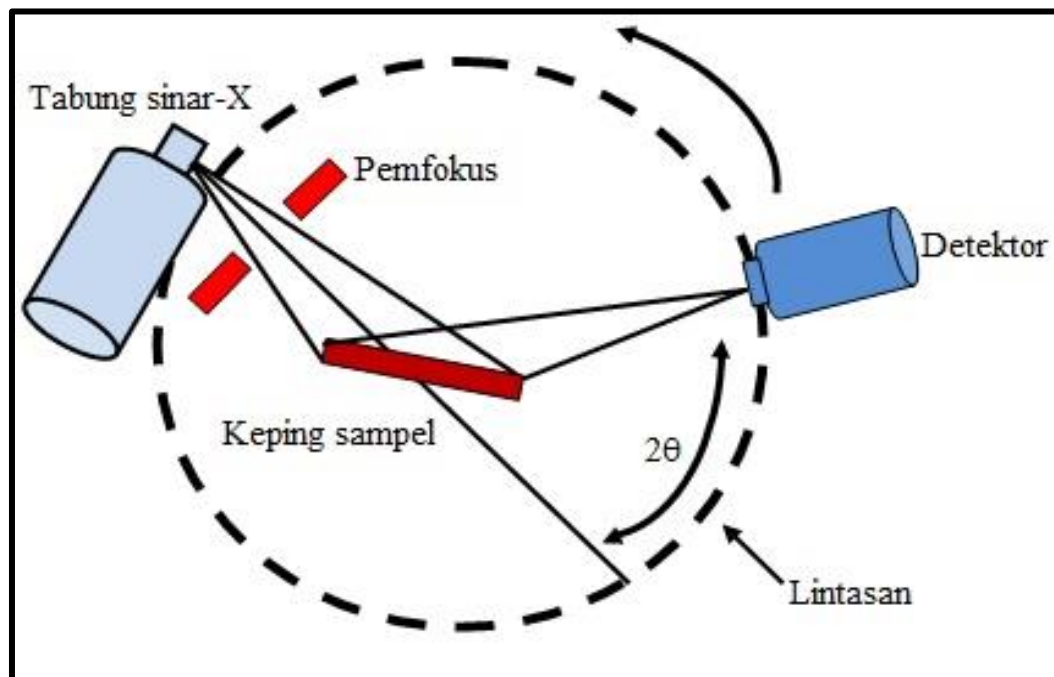
kelimpahan mineral bijih sehingga mendukung dalam penentuan paragenesis mineralisasi (Sedewo, 2018).

2.10.2 Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)

Difraksi sinar-X (XRD) adalah metode analisis yang serbaguna dan tidak merusak sifat material seperti komposisi fasa, struktur, tekstur dan banyak lagi sampel bubuk, sampel padat atau bahkan sampel cair. Identifikasi fase dicapai dengan membandingkan pola difraksi sinar-X diperoleh dari sampel yang tidak diketahui dengan pola database (Iwashita, 2016). Difraksi sinar-X dapat digunakan dengan cara biasa untuk mengidentifikasi potensi mineral reaktif alkali-silika yang mungkin tidak mudah diidentifikasi bagian tipis dilihat di bawah mikroskop petrografi, baik karena partikelnya terlalu halus.

X-ray diffraction (XRD) merupakan salah satu metode karakteristik material yang paling tua dan paling sering digunakan hingga sekarang. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel. Bahan yang dianalisis adalah tanah halus, *homogenized* dan rata-rata komposisi massal ditentukan pada waktu suatu material dikenai sinar-X, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Hasil dari penembakan logam dengan elektron energi tertinggi dengan karakterisasi tersebut sinar-X mampu menembus zat padat sehingga dapat digunakan untuk menentukan struktur kristal. Hamburan sinar ini dihasilkan bila suatu elektron logam ditembak dengan elektron-elektron berkecepatan tinggi dalam tabung hampa udara (Beiser, 1992).

Salah satu teknik yang digunakan untuk menentukan struktur suatu padatan kristalin adalah dengan menggunakan metode difraksi sinar-X serbuk (*X-ray powder diffraction*) seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Prinsip kerja *x-ray diffraction* (XRD).

2.11 Analisis Kimia Bijih

Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) adalah seperangkat alat untuk menentukan unsur dan isotop secara simultan yang terkandung dalam berbagai jenis cuplikan. Alat ini adalah gabungan plasma ICP sebagai sumber ionisasi dengan spektrometer masa (MS) sebagai pemilah dan pencacah ion. Metode ini lazim disebut ICP MS (Vella et al., 1993).

Prinsip kerja ICP MS dengan menggabungkan ICP suhu tinggi (induktif ditambah plasma) sumber dengan spektrometer massa. ICP sumber mengubah atom dari unsur unsur dalam sampel untuk ion. Ion ini kemudian dipisahkan dan dideteksi oleh spektrometer massa. Berikut merupakan gambaran singkat ICP MS menganalisis sampel. Saat ini penggunaan ICP MS sudah meluas dalam berbagai bidang seperti geologi, industri, makanan, kesehatan, lingkungan dan lain-lain sebagainya. ICP-MS mempunyai beberapa komponen utama di antaranya adalah ICP, *interface*, lensa, *mass analyzer* dan detektor (Date, 1989).

ICP OES merupakan perangkat canggih untuk penentuan logam dalam berbagai matriks sampel yang berbeda. ICP dikembangkan untuk spektrometri emisi optik. Instrumen ICP OES yang tersedia secara komersial pertama kali diperkenalkan pada tahun 1974 (Hou and Jones, 2000), untuk mendapatkan

informasi kualitatif, yaitu unsur apa yang terdapat dalam sampel, melibatkan identifikasi adanya emisi pada panjang gelombang khas dari unsur yang dituju. Secara umum, setidaknya tiga garis spektrum dari unsur yang diperiksa untuk memastikan bahwa emisi yang diamati memang benar merupakan milik unsur yang dituju. Terkadang gangguan garis spektral dari unsur lain mungkin membuat suatu ketidakpastian tentang adanya unsur dalam plasma untungnya, dari sejumlah besar garis emisi yang tersedia untuk sebagian besar unsur memperbolehkan salah satu garis emisi yang dapat mengatasi gangguan tersebut dengan cara memilih diantara beberapa garis emisi yang berbeda untuk unsur yang dituju (Charles *et al.*, 1997).

Dibandingkan dengan teknik lain, ICP OES memiliki suhu atomisasi yang lebih tinggi, lingkungan yang lebih *inert* dan kemampuan alami untuk penentuan hingga 70 elemen secara bersamaan. Hal ini membuat ICP lebih tahan terhadap gangguan matriks dan lebih mampu untuk mengoreksinya ketika terjadi gangguan matriks. ICP OES menyediakan batas deteksi serendah, atau lebih rendah dari pesaing terbaiknya, GF AAS. Selain itu, ICP tidak menggunakan elektroda, sehingga tidak ada kontaminasi dari pengotor yang berasal dari bahan elektroda. ICP juga relatif lebih mudah dalam perakitannya dan murah, dibandingkan dengan beberapa sumber lain, seperti LIP (*laser-induced plasma*) (Hou and Jones, 2000).

2.12 Uji Kinetik

Pengujian ini bertujuan untuk memahami kinetika reaksi pembentukan asam pada sampel melalui suatu simulasi reaksi oksidasi dalam batuan. Melalui uji ini dapat diprediksi karakteristik pelapukan jangka panjang sebagai fungsi dari waktu. Berbagai hal yang dapat diperoleh dari uji kinetik adalah:

1. Memberikan konfirmasi tentang potensi pembentukan AAT.
2. Mengetahui laju reaksi oksidasi sulfur dan pembangkitan asam.
3. Mengetahui berkurangnya potensi penetralan.
4. Memperkirakan tingkat pelindian logam dan memberikan indikasi konsentrasi kation/anion pada air tambang.
5. Memilih strategi uji yang tepat untuk mengevaluasi rencana pengelolaan AAT dan strategi pengendalian yang berbeda (Gautama, 2014).

Free Draining Column Leach (FDCL) atau uji kolom pelindian biasanya dilakukan untuk memberikan informasi terkait reaktivitas mineral sulfida, laju pelapukan atau oksidasi, kelarutan logam dan masalah air lindian atau *leachate* karena relatif sederhana uji ini sering dilakukan baik di laboratorium maupun di lapangan. FDCL umumnya digunakan untuk sampel batuan dan *waste material* dengan ukuran sampel batuan yang akan dimasukkan kedalam *bucher funnel*, biasanya digunakan ukuran 4 mm agar permukaan material dapat terekspos dengan baik. *Tailing* dapat juga dimasukkan tanpadilakukan preparasi terlebih dahulu. Beberapa material yang memiliki ukuran sampel yang sangat halus atau memiliki kandungan lempung yang tinggi, mungkin tidak akan cocok jika di uji menggunakan metode FDCL.

Sampel dirancang untuk mengalami siklus basah-kering baik harian, mingguan atau bulanan. Siklus basah diawali dengan cara menyiramkan air destilat ke permukaan sampel batuan dan air lindian akan dikumpulkan pada tempat penampung dibawah *funnel*. Lampu digunakan untuk memberikan efek panas sehingga sampel mengalami siklus kering (Gautama, 2014). Contoh pengujian kinetik FDCL dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6 Pengujian kinetik metode FDCL (Mansyur, 2014)