

SKRIPSI

**ANALISIS KOROSI TERHADAP KEKUATAN *WIREMESH*
PADA AREA *HEAVY SULFIDE ZONE (HSZ)*
TAMBANG BAWAH TANAH**

(Studi Kasus: PT Freeport Indonesia, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua)

Disusun dan diajukan oleh

GEOFANNY AMANDA IMANUELA LOPULISA

D62116501



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS KOROSI TERHADAP KEKUATAN *WIREMESH*
PADA AREA *HEAVY SULFIDE ZONE (HSZ)*
TAMBANG BAWAH TANAH**

(Studi Kasus: PT Freeport Indonesia, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua)

Disusun dan diajukan oleh

GEOFANNY AMANDA IMANUELA LOPULISA

D62116501

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 25 Januari 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T.

NIP. 196807181993091001

Pembimbing Pendamping,



Meinarni Thamrin, S.T., M.T.

NIP. 197105122008122001

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Purwanto, S.T., M.T.

NIP. 197111282005011002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Geofanny Amanda Imanuela Lopulisa
NIM : D62116501
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Analisis Korosi Terhadap Kekuatan *Wiremesh* Pada Area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) Tambang Bawah Tanah
(Studi Kasus: PT Freeport Indonesia, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua)

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

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

Makassar, 25 Januari 2021

Yang menyatakan



Georanny Amanda Imanuela Lopulisa

ABSTRAK

Sistem penyangga merupakan hal penting yang harus diperhatikan dalam menjaga kestabilan lubang bukaan tambang bawah tanah. Permasalahan yang sedang dihadapi PT Freeport Indonesia (PTFI) adalah penurunan kestabilan terowongan. Penurunan ini disebabkan oleh korosi pada sistem penyangga permukaan (*wiremesh*) yang kontak langsung dengan mineral pirit, atmosfer, dan air. Hal ini terjadi pada salah satu area pada tambang bawah tanah PTFI yaitu area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) yang memiliki potensi korosi lebih tinggi dibandingkan area lainnya. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis potensi korosi pada area HSZ, dan pengaruhnya terhadap kekuatan tarik *wiremesh*. Metode yang digunakan yaitu, pengujian kuat tarik pada *wiremesh*, dan analisis data menggunakan matriks potensi faktor korosi serta analisis regresi linier. Berdasarkan hasil dari pengolahan data geologi, atmosfer, dan air tanah dengan menggunakan matriks potensi faktor korosi, maka potensi korosi dikategorikan korosi sedang sampai parah. Pengaruh korosi terhadap penurunan kekuatan tarik *wiremesh* dapat diperoleh dari hubungan antara kekuatan tarik *wiremesh* dengan waktu pemaparan menggunakan analisis regresi linier. Hasil analisis diperoleh hubungan yang sangat tinggi dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,94, nilai koefisien determinasi sebesar 0,885 dan pengaruh waktu pemaparan terhadap kekuatan *wiremesh* sebesar 88,5%. Hasil penelitian menunjukkan lingkungan yang korosif dapat menyebabkan penurunan kekuatan *wiremesh*, dengan nilai kekuatan tarik *wiremesh* pada potensi korosi sedang berkisar antara 506,02-119,37 MPa, korosi tinggi 509,26-70,19 MPa dan korosi parah 427,26-421,15 Mpa.

Kata kunci: *Heavy Sulfide Zone*; tambang bawah tanah; *wiremesh*; kekuatan tarik; korosi.

ABSTRACT

Ground support is one of the important aspects that need to be considered in maintaining the slope stability of underground mine. PT Freeport Indonesia (PTFI) faces tunnel stability problems. The decreasing occurred due to corrosion of the surface ground support (wiremesh) which directly in contact with pyrite minerals, atmosphere, and water. This condition exists in one of the PTFI's underground mine, known as the Heavy Sulfide Zone (HSZ), which has a higher corrosion potential than other areas. Objective of this study is to analyze the potential of corrosion in the HSZ and its effect on the tensile strength of the wiremesh. The methods used are tensile strength testing on wiremesh, and data analysis using a matrix of potential corrosion factors and linear regression analysis. Based on the results of processing geological, atmospheric, and groundwater data using a matrix of potential corrosion factors, the corrosion potential was categorized as moderate to severe corrosion. The corrosion effect on the decreasing of wiremesh tensile strength obtained from the relationship between the tensile strength of the wiremesh and the length of exposure time using linear regression analysis. The results of the analysis expressed a strong relationship with a correlation coefficient was 0.94, the coefficient of determination of 0.885 and the effect of exposure time on wiremesh strength was 88.5%. The research results showed that a corrosive environment can cause a decrease in wiremesh tensile strength with the wiremesh strength values for moderate corrosion potential ranged from 506,02-119,37 MPa, for high corrosion ranged 509,26-70,19 MPa, and for severe corrosion was 427,26-421,15 Mpa.

Keywords: Heavy Sulfide Zone; underground mine; wiremesh; tensile strength; corrosion.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat, dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi untuk dengan judul "Analisis Korosi Terhadap Kekuatan *Wiremesh* pada Area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) Tambang Bawah Tanah PT Freeport Indonesia". Penelitian ini membahas mengenai penurunan kekuatan tarik *wiremesh* (penyangga permukaan) akibat pengaruh korosi pada area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) Tambang Bawah Tanah PT Freeport Indonesia.

Selesainya Skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, dan masukan-masukan kepada penulis. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Freeport Indonesia bagian Departemen Hidrologi Tambang Bawah Tanah atas kesempatan yang telah diberikan kepada penulis untuk mendapat pengalaman, dan mengerjakan penelitian. Ucapan terima kasih kepada Bapak Fari Putra, Bapak Darajatna, Bapak Unggul Barito, dan Bapak Jack Singgir selaku pembimbing, Bapak Jefrison Rumbewas selaku user penulis selama melaksanakan penelitian, dan seluruh karyawan PTFI bagian Departemen Geotek Tambang Bawah Tanah serta teman-teman magang yang telah membantu, dan memberikan motivasi kepada penulis.

Terima kasih kepada dosen pembimbing I selaku Kepala Laboratorium Hidrologi dan Lingkungan Tambang Bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T., Ibu Meinarni Thamrin S.T., M.T., selaku pembimbing II dan Ibu Andi Arumansawang ST. MT., yang telah meluangkan waktunya untuk memberi bimbingan, dan masukan kepada penulis sehingga Skripsi ini dapat diselesaikan tepat waktu. Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh dosen, dan pegawai Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua Bapak Chres Lopulisa, dan Ibu Ellen Noya yang selalu memberikan motivasi, dukungan doa, dan material sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan baik. Terima kasih kepada teman-teman ROCKBOLT 2016, dan seluruh anggota Laboratorium Hidrologi dan Lingkungan Tambang Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Akhirnya, penulis berharap semoga Skripsi ini dapat bermanfaat kedepannya, dan sebagai referensi untuk pengembangan pengetahuan mengenai korosi pada *wiremesh* di area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) tambang bawah tanah.

Makassar, Januari 2021

Geofanny A I Lopulisa

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN SAMPUL	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian.....	4
1.6 Lokasi Penelitian.....	6
BAB II <i>HEAVY SULFIDE ZONE, KOROSI, DAN WIREMESH</i>	9
2.1 <i>Heavy Sulfide Zone</i>	9
2.2 Korosi	13

2.3	Penilaian Potensi Korosi di Tambang	19
2.4	Penyanggaan Tambang Bawah Tanah	24
2.5	<i>Wiremesh</i>	27
2.6	Uji Kuat Tarik.....	28
2.7	Analisis Regresi	30
BAB III METODE PENELITIAN.....		34
3.1	Pengambilan Data dan Sampel.....	35
3.2	Pengujian Kuat Tarik.....	38
3.3	Pengolahan Data	42
BAB IV POTENSI KOROSI DAN KEKUATAN TARIK <i>WIREMESH</i>		47
4.1	Analisis Potensi Korosi.....	47
4.2	Analisis Pengaruh Korosi Terhadap Kekuatan Tarik <i>Wiremesh</i>	54
BAB V PENUTUP		61
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		67

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Tahapan Penelitian	6
1.2 Peta Kesampaian Daerah PT Freeport Indonesia	7
2.1 Satuan Hidrotermal pada Grasberg	11
2.2 Klasifikasi Lingkungan Korosif Atmosfer, dan Perkiraan Laju Korosi Seragam untuk Baja Karbon	15
2.3 Klasifikasi Lingkungan Korosif Berair, dan Perkiraan Laju Korosi Seragam untuk Baja Karbon	17
2.4 Fungsi Penyangga.....	24
2.5 Tipe <i>Steel Rib</i>	26
2.6 Jenis-jenis <i>Wiremesh</i>	27
2.7 <i>Wiremesh</i>	28
3.1 Diagram Alir Penelitian	34
3.2 Pengukuran Kelembaban, dan Suhu.....	35
3.3 Pengukuran Data Air Tanah	36
3.4 Pengambilan Sampel <i>Wiremesh</i>	37
3.5 Penamaan Kode Sampel	38
3.6 Alat Uji Kuat Tarik.....	39
3.7 Peralatan Preparasi Sampel <i>Wiremesh</i>	40
3.8 Dimensi Sampel yang akan Diuji.....	40
3.9 Hasil Sampel Sebelum, dan Sesudah Pengujian.....	41
3.10 Tampilan Menu Utama	44
3.11 Tampilan Penginputan Nama Variabel	44
3.12 Tampilan Data X dan Y	45
3.13 Tampilan Menu <i>Linier Regression</i>	45

3.14	Tampilan Menu Pengeditan Grafik	46
3.15	Tampilan Grafik Korelasi Linier	46
4.1	Kandungan Pirit Stasiun 1-3.....	47
4.2	Kandungan Pirit Stasiun 4-24.....	48
4.3	Kondisi Aliran Air Stasiun 1-3	50
4.4	Kondisi Aliran Air Stasiun 4-24.....	50
4.5	Indikasi Potensi Korosi Stasiun 1-3	53
4.6	Indikasi Potensi Korosi Stasiun 4-24.....	53
4.7	Kondisi <i>Wiremesh</i> di Lokasi Penelitian	55
4.8	Grafik Korelasi Kekuatan Tarik <i>Wiremesh</i> dengan Waktu Pemaparan	59

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2.1	Klasifikasi Rembesan Air	21
3.1	Matriks Potensi Faktor Korosi	43
4.1	Indikasi Potensi Korosi Pada Lokasi Penelitian	52
4.2	Hasil Pengambilan Data <i>Wiremesh</i>	56
4.3	Kriteria Koefisien Korelasi	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A Data Indikasi Potensi Korosi	68
B Spesifikasi <i>Wiremesh</i> 5.6 mm	70
C Spesifikasi <i>Wiremesh</i> 8.0 mm	72

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perencanaan konstruksi terowongan tambang bawah tanah selalu dikaitkan dengan perilaku ketidakstabilan lubang bukaan. Ketidakstabilan menyebabkan terjadinya kerusakan atau bahkan dapat menyebabkan keruntuhan baik pada atap (*back*) maupun dinding (*rib*) terowongan. Ketidakstabilan ini dapat dipengaruhi oleh kualitas massa batuan, struktur geologi, tegangan pada massa batuan, bentuk terowongan, dan metode penambangan serta sistem penyangga yang digunakan (Panthi, 2006).

Stabilitas terowongan dapat ditingkatkan dengan sistem penyangga. Sistem penyangga secara umum dibedakan dalam beberapa jenis yaitu *steel sets*, *shotcrete*, *rockbolt*, dan *wiremesh* (Jing dan Ove, 2007). *Steel set* merupakan penyangga pasif yang cukup kuat, menggunakan sifat interaktif karakteristik deformasi beban kedua massa batuan, dan penyangga. *Shotcrete* merupakan beton yang disemprotkan untuk menambah kekuatan terdiri dari campuran semen, air, dan agregat. Termasuk dalam jenis penyangga permukaan pasif yang digunakan untuk dapat menahan gaya yang bekerja pada batuan, dan menambah kekuatan suatu permukaan. *Rockbolt* adalah penyangga aktif yang terbuat dari baja dan berpenampang bulat yang digunakan untuk memberi penguatan massa batuan dengan tujuan memperkecil deformasi atau menjaga kestabilan terowongan. *Rockbolt* terdiri dari tiga jenis, yaitu *resin bolt*, *cable bolt*, dan *split set* (Hoek, 1995). *Wiremesh* merupakan penyangga permukaan pasif yang digunakan untuk mencegah material batuan yang kecil agar tidak jatuh. *Wiremesh* sering

digabungkan untuk memperkuat *shotcrete*, dan mengikat *bolt* yang satu dengan yang lain untuk tetap mempertahankan kondisi batuan ketika ada *stress*.

PT Freeport Indonesia (PTFI) merupakan perusahaan tambang yang menerapkan sistem tambang bawah tanah. Sistem penambangan ini sedang dalam tahap pengembangan (*development*). Pada tahapan pengembangan selalu dikaitkan dengan sistem penyangga yang merupakan kekuatan utama dalam menjaga kestabilan lubang bukaan. Penentuan sistem penyanggaan yang akan dipasang di tambang bawah tanah harus memperhatikan beberapa kondisi seperti detail lubang bukaan, estimasi tegangan, data geologi, estimasi perilaku batuan, dan desain penyangga batuan itu sendiri. Jenis penyangga yang digunakan PT Freeport Indonesia yaitu *steel set*, *shotcrete*, *rockbolt*, dan *wiremesh* (Ginting dkk, 2017).

Salah satu permasalahan dihadapi PT Freeport Indonesia adalah penurunan kestabilan terowongan dikarenakan oleh korosi pada sistem penyangga permukaan (*wiremesh*). Potensi korosi yang terjadi sangat bervariasi tergantung pada variabel lingkungan, seperti suhu, kelembaban, total padatan terlarut, laju aliran, dan zat-zat kimia (Dorion et al, 2015). Sehubungan dengan *wiremesh* yang terbuat dari logam, maka penyangga ini mudah mengalami korosi dikarenakan kontak langsung dengan batuan yang mengandung mineral pirit, atmosfer dan air.

Salah satu area pada tambang bawah tanah PT Freeport Indonesia yang memiliki potensi korosi tinggi yaitu *Heavy Sulfide Zone* (HSZ). *Heavy Sulfide Zone* adalah area dengan batuan yang mengalami alterasi dan berbentuk seperti cangkang silinder, membatasi kontak kompleks batuan intrusi Grasberg dengan batuan sedimen, memiliki kandungan mineral sulfida yang tersusun dari pirit yang lebih dari 20%. Keterdapatannya mineral sulfida yang teroksidasi oleh oksigen di udara, dan berkorelasi dengan aliran air disekitarnya akan membentuk kondisi air asam lokal dan menciptakan reaksi elektrokimia logam berupa korosi (Silaen dan Budiman, 2017). Oleh karena itu, perlu dilakukan

analisis untuk mengetahui bagaimana potensi korosi dan pengaruhnya terhadap penurunan kekuatan *wiremesh* pada area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) Tambang Bawah Tanah PT Freeport Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Penerapan sistem tambang bawah tanah PT Freeport Indonesia dalam tahap pengembangan. Pada tahapan ini sistem penyangga merupakan salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam menjaga kestabilan lubang bukaan. PT Freeport Indonesia, memiliki beberapa jenis sistem penyanggaan yang sudah terpasang yang terdiri dari *steel set*, *shotcrete*, *rockbolt*, dan *wiremesh*. Jenis penyangga yang terpasang akan berbeda pada masing-masing area karena disesuaikan dengan kondisi di lapangan, kondisi geologi, ukuran, kegunaan, dan kedalaman dari lubang bukaan terhadap permukaan pada masing-masing area tambang tersebut.

Permasalahan yang sedang dihadapi PTFI adalah terganggunya kestabilan lubang bukaan akibat korosi pada sistem penyangga permukaan (*wiremesh*). Korosi pada *wiremesh* menyebabkan penurunan kemampuan sistem penyangga untuk bekerja secara maksimal selama masa kerja yang diinginkan. Penelitian ini difokuskan pada area *Heavy Sulfide Zone* yang memiliki potensi korosi tinggi, dikarenakan adanya kandungan mineral pirit yang lebih dari 20%. Berdasarkan hal tersebut permasalahan yang ingin dibahas dalam penelitian ini adalah potensi korosi pada area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ), dan kekuatan tarik *wiremesh*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian adalah:

1. Menganalisis potensi korosi pada area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ) tambang bawah tanah.

2. Menganalisis pengaruh korosi terhadap kekuatan tarik *wiremesh*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan perbandingan atau referensi pada penelitian yang berkaitan dengan potensi korosi pada *Heavy Sulfide Zone* (HSZ). Selain itu, hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi kepada perusahaan dalam penilaian potensi korosi pada area *Heavy Sulfide Zone* (HSZ), dan penurunan kekuatan tarik *wiremesh* penyangga permukaan tambang bawah tanah yang sudah mengalami korosi berdasarkan lama waktu pemaparannya.

1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian

Tahapan penelitian adalah tahapan yang digunakan selama penelitian untuk menyelesaikan penelitian yang dilaksanakan. Studi ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

1. Perumusan masalah

Tahapan ini dilakukan untuk merumuskan konsep studi yang meliputi penentuan tema atau topik studi, mengidentifikasi, dan merumuskan masalah, melakukan studi Pendahuluan, dan konstruksi hipotesis, serta menyusun rencana studi. Tahapan ini menghasilkan proposal studi.

2. Studi literatur

Tahap ini termasuk tahapan sebelum dan selama penelitian berlangsung berupa kajian informasi literatur untuk menunjang, dan memahami topik yang diteliti dan sebagai petunjuk dalam menentukan rancangan penelitian. Referensi studi literatur pada penelitian ini berupa jurnal, buku, kumpulan artikel dalam buku, dan referensi lainnya.

3. Pengambilan data

Tahapan ini merupakan tahap pengambilan data-data yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian serta hal-hal yang berkaitan dengan masalah yang akan diteliti. Data yang sudah dikumpulkan adalah semua data yang berkaitan, dan mendukung penelitian baik berupa data di lapangan maupun data yang diperoleh dari penelitian terdahulu.

4. Pengolahan dan analisis data

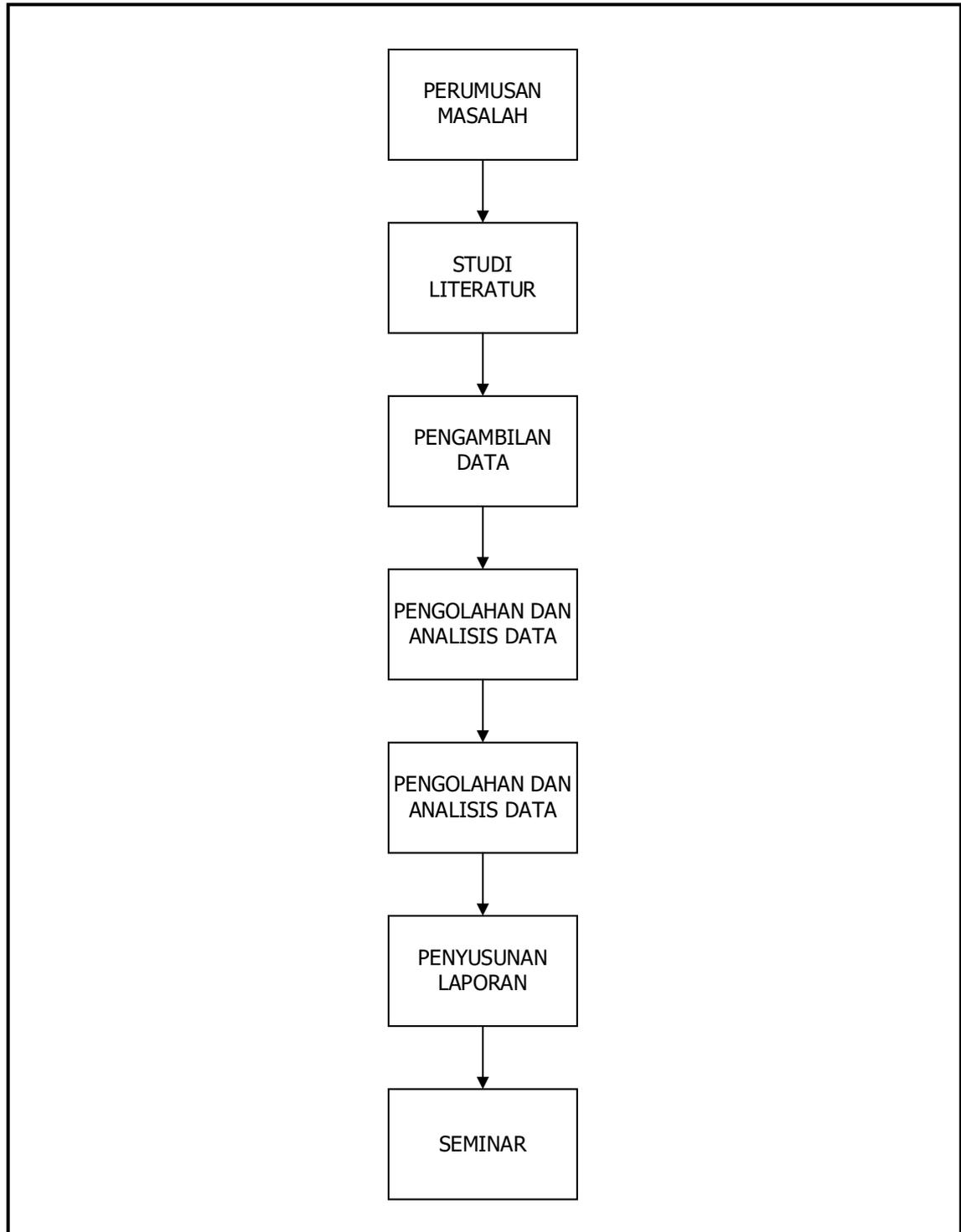
Tahapan pengolahan data hasil pengambilan data di lapangan dilakukan secara ilmiah untuk mencapai tujuan penelitian berdasarkan metodologi. Kegiatan selanjutnya setelah pengolahan data yaitu analisis data untuk mengetahui hasil dari penelitian yang daripadanya diharapkan terdapat pemecahan dari permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini, dan kesimpulan atas penelitian yang telah dilakukan.

5. Penyusunan laporan

Tahapan paling akhir dalam rangkaian kegiatan penelitian. Seluruh hasil penelitian akan disusun dalam bentuk *draft* laporan hasil penelitian (skripsi). Laporan hasil penelitian kemudian dilaporkan secara sistematis sesuai aturan penulisan buku putih yang telah ditetapkan oleh Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

6. Seminar

Tahapan ini dimaksudkan untuk memaparkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Kegiatan seminar ini dapat terlaksana dengan izin pembimbing setelah Melalui tahapan ini akan didapatkan saran-saran untuk menyempurnakan laporan tugas akhir dari tim penguji, pembimbing, dan peserta seminar. Laporan tugas akhir yang telah direvisi selanjutnya diserahkan ke Departemen Teknik Pertambangan.

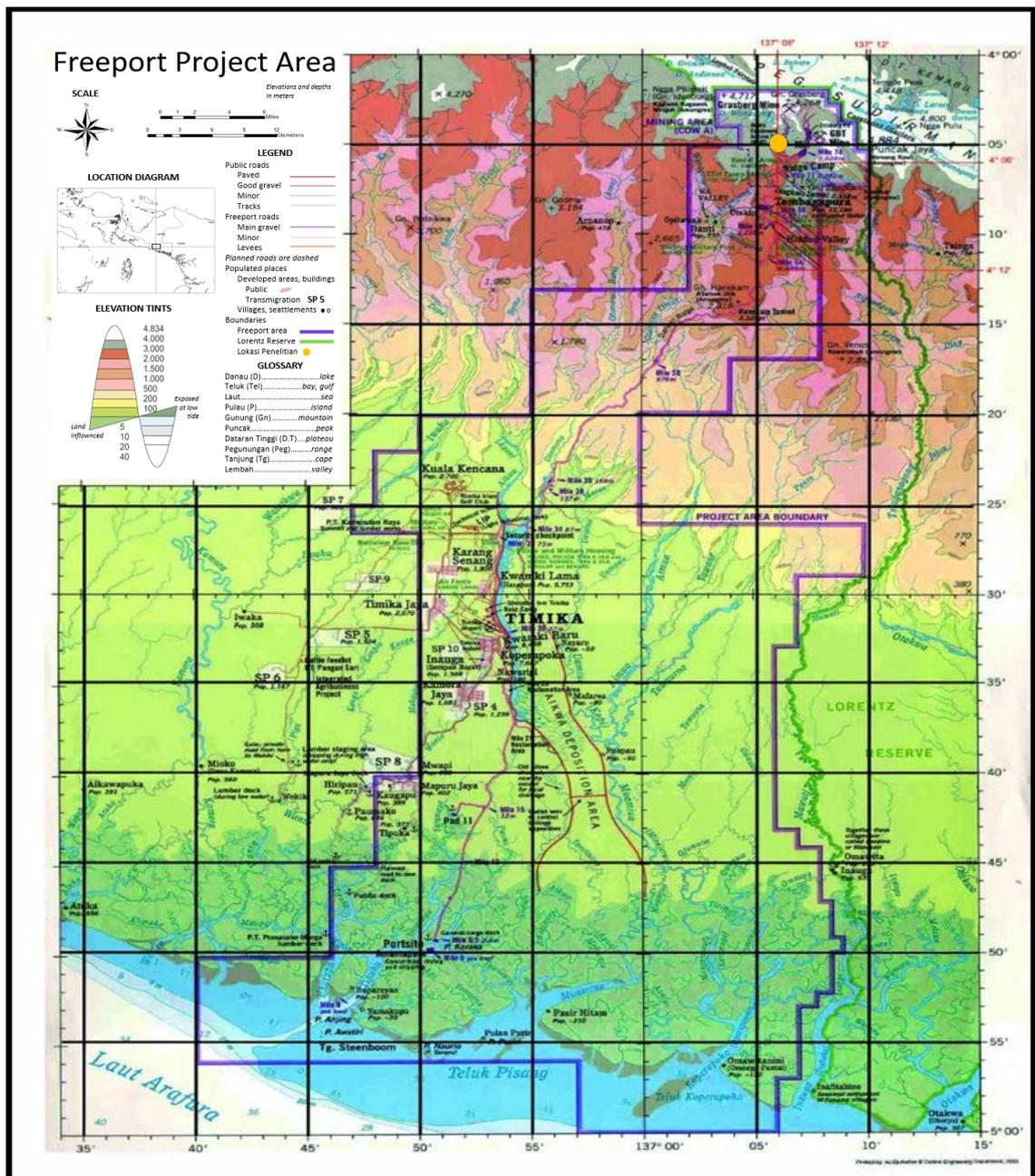


Gambar 1.1 Tahapan Penelitian

1.6 Lokasi Penelitian

PT Freeport Indonesia merupakan perusahaan tambang terbesar di Indonesia dengan luas wilayah Kontrak Karya seluas 10.000 hektar (Gambar 1.2). PT Freeport

Indonesia terletak di barisan Pegunungan Sudirman, Kecamatan Mimika Timur, Kabupaten Mimika, Propinsi Papua, dan berada pada posisi geografis 04° 02' 30" – 04° 11' 30" Lintang Selatan (*South Latitude*), dan 137° 02' 30" – 137° 10' 00" Bujur Timur (*EastLongitude*).



Gambar 1.2 Peta Kesampaian Daerah PT Freeport Indonesia (PTFI, 2019).

Waktu yang harus ditempuh dari bandara udara Sultan Hasanuddin Makassar menuju bandara udara Mozes Kilangin Timika yaitu ±3 jam. Kegiatan operasional PT

Freeport Indonesia dapat dicapai melalui dua jalur yaitu jalur laut melalui pelabuhan laut Amamapare, dan jalur udara dengan menggunakan bandara udara Mozes Kilangin-Timika. Perjalanan dari Timika ke Kota Tembagapura (*Mile 68*) dapat ditempuh sekitar dua jam bila menggunakan bus atau dengan menggunakan jalur udara dengan helikopter (*chopper*) selama 15 menit.

Lokasi penelitian berada pada salah satu Tambang Bawah Tanah PT Freeport Indonesia, untuk menuju ke lokasi penelitian dapat ditempuh menggunakan kendaraan kecil (*light vehicle*), dan bus dari kota Tembagapura selama kurang lebih 30 menit sejauh 10 km. Akses menuju ke lokasi penelitian melalui ARD *portal* atau terowongan Ali Budiardjo (*AB Tunne*) sebagai akses masuk menuju tambang bawah tanah.

BAB II

HEAVY SULFIDE ZONE, KOROSI, DAN WIREMESH

2.1 *Heavy Sulfide Zone*

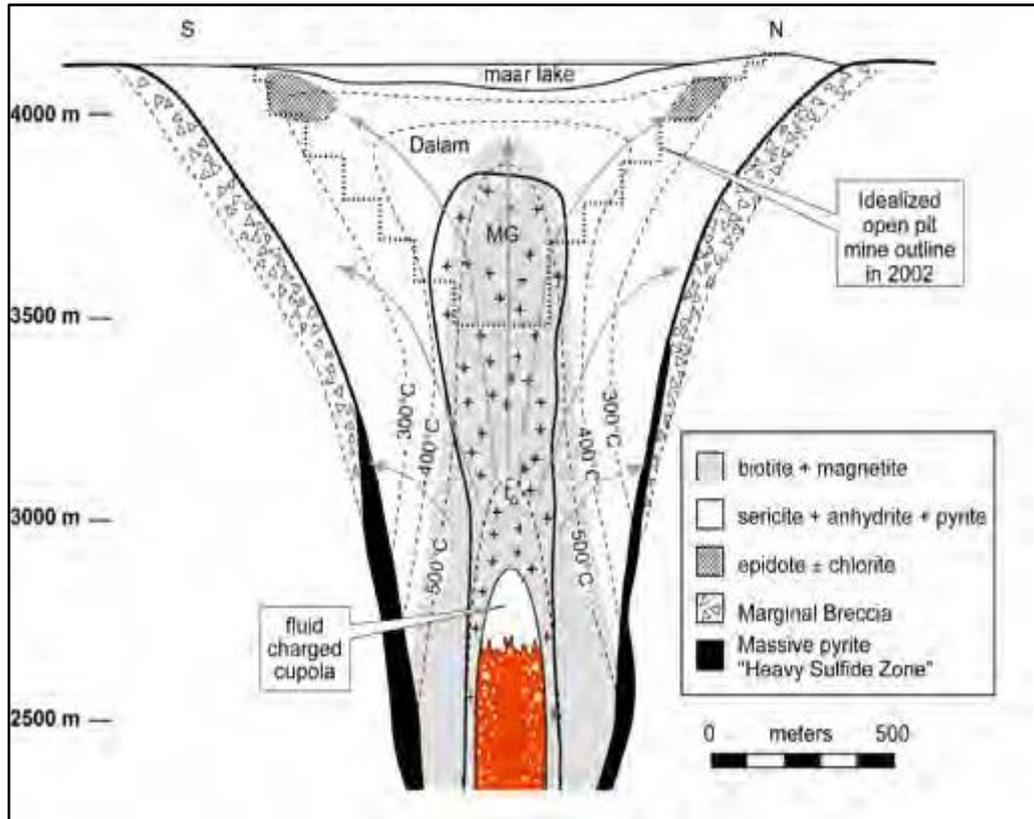
Heavy Sulfide Zone adalah zona yang mengelilingi *Grasberg Igneous Complex* (GIC), menjadi batas kontak antara batuan *Grasberg Igneous Complex* (GIC), dan batugamping. Pengamatan permukaan memperlihatkan bahwa *Heavy Sulfide Zone* memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu pada bagian tertentu pada bagian selatan lebih banyak mengandung kovelit, dan bornit, sedangkan bagian timur laut memiliki lebih banyak sphalerite, dan galena, dan di bagian barat-barat laut kandungan emasnya tinggi. MacDonald dan Arnold (1994) menyebutkan bahwa *Sulfide Rich-Skarn (Heavy Sulfide Zone)* merupakan batuan dengan kandungan pirit lebih dari 20%, bentuknya melidat pada elevasi lebih dari 3800 m, dan menjari dengan *Marginal Breccia*, sedangkan di elevasi kurang dari 3800 m berupa corong silindris yang membatasi *Grasberg Igneous Complex* (GIC) dengan batuan karbonat.

Kontak *Marginal Breccia* dengan batugamping bergradasi dalam beberapa meter. Pada kedalaman kontak ke arah inti berupa *Heavy Sulfide Zone*, sedangkan pada permukaan kontak dengan *Grasberg Igneous Complex*. Permukaan fragmennya berupa marmer, batugamping, dan batuan beku yang dilingkupi matriks berwarna gelap dari kuarsa, pirit, serisit, biotit, klorit, dan mineral lempung minor. Dimana jika sulfida banyak, fragmen marmer lebih membundar. Fragmen batuan karbonat umumnya subangular, namun fragmen batuan beku berbentuk *subrounded*. *Marginal Breccia* terbentuk dari disolusi, pembentukan gua, dan runtuhnya batuan karbonat pada tepi *Grasberg Igneous Complex* akibat infiltrasi fluida hidrotermal yang asam (Sappie, 1998).

Ketebalan dari *Marginal Breccia* yang ditemukan pada tepi *Heavy Sulfide Zone* pada cabang Kucing Liar mencapai tebal 11 m. *Marginal Breccia* yang termarmirkan menjadi bukti dari pemanasan, dan rekristalisasi mineralisasi pada *Heavy Sulfide Zone*. *Grasberg Igneous Complex* (GIC) ke arah *Marginal Breccia*, himpunan mineral sulfida adalah pirit + kovelit minor + kalkopirit minor + jejak bornit + trace digenit, pirit + kovelit + sfalerit minor + galena minor, dan pirit + sfalerit + galena minor. Unsur minor didefinisikan hadir 1-5% dari volume total sampel, sedangkan unsur jejak didefinisikan kurang dari 1% dari volume total sampel. Dari *Heavy Sulfide Zone* ke arah batuan karbonat, himpunan mineral sulfida berupa pirit ± kalkopirit, dan pirit + sfalerit minor. Analisis isotop PB mengindikasikan tidak ada komponen batuan dinding pada *Heavy Sulfide Zone*, fluida pembentuk pirit berasal dari magmatik.

Interpretasi dari *Heavy Sulfide Zone*, dan *Marginal Breccia* merupakan hasil dari infiltrasi, dan reaksi fluida hidrotermal dari *cupola* yang ditekan oleh fluida, dimana tekanan fluida sama besarnya dengannya tekanan litostatik. Pendinginan fluida hidrotermal dan disolusi dari batuan karbonat, serta presipitasi sulfida merupakan hal yang membentuk *Heavy Sulfide Zone* (Lambert, 2000).

Penelitian sebelumnya (Sapiie, 1998; C. Lambert, 2000; Paterson *and* Cloos, 2005) menyimpulkan bahwa *Heavy Sulfide Zone* terbentuk dari disolusi batuan samping berupa karbonat, dan bersamaan dengan presipitasi pirit dari fluida yang membentuk alterasi pada *Grasberg Igneous Complex*. Alterasi dan disolusi dihasilkan oleh fluida magmatik yang asam dan dingin yang bergerak ke atas, dan keluar dari *cupola* yang ditekan oleh fluida lain di bawah GIC. Gambar 2.1 menunjukkan sistem hidrotermal Grasberg dengan jalur aliran fluida yang ideal yang berasal dari *cupola* bermuatan fluida (Cloos, 2001) untuk memperhitungkan biotit + magnetit ± andalusit di inti deposit (zona pusat panas), dan serisit + pirit ± anhidrit di pinggiran deposit (zona perifer yang lebih dingin) (Paterson *and* Cloos, 2005).



Gambar 2.1 Satuan Hidrotermal pada Grasberg (Paterson *and* Cloos, 2005).

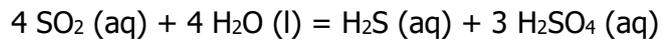
Breksi tepian (*Marginal Breccia*) tersusun oleh fragmen marmer dan batugamping yang tersuspensi pada matriks lanau gelap yang merupakan produk dari disolusi Batugamping Kali. Matriks lanau gelap pada breksi tepian berkurang ke arah kontak dengan *Heavy Sulfide Zone*, yang menunjukkan disolusi yang lebih intensif pada *Heavy Sulfide Zone*. Porositas dan permeabilitas juga meningkat pada tepian intrusi yang dicirikan oleh *Heavy Sulfide Zone*. *Marginal Breccia* pada bagian dalam umumnya merupakan didukung oleh matriks, sedangkan yang di bagian luar di dukung oleh butiran. Fragmennya terdiri dari marmer dan beberapa batugamping.

Larutan asam (HCl) diproduksi pada sistem panas pada presipitasi *stockwork* magnetit (Paterson *and* Cloos, 2005b):

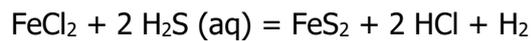


Sedangkan pada temperatur 400 – 300°C pada tepi *Grasberg Igneous Complex* (GIC) fenokris plagioklas primer dan masa dasar ortoklas teralterasi menjadi serisit. Saat fluida

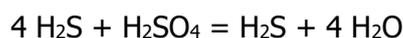
magmatik mendingin (500°C), SO_2 pada fluida hidrotermal mulai mencair untuk memproduksi sulfur tereduksi dan H_2SO_4 dengan reaksi:



Sulfur tereduksi secara berkala bereaksi dengan logam pada larutan untuk membentuk logam sulfida. Presipitasi dari pirit menghasilkan HCl dan hidrogen bebas:



Fluida yang bergerak pada kontak *Grasberg Igneous Complex* (GIC) dengan batuan karbonat memiliki kandungan H_2SO_4 dan HCl yang tinggi, yang menyebabkan pelarutan yang memanjang dan pembentukan lubang atau gua. Batuan penyangga berupa batuan karbonat yang menyokong batuan kaya pirit larut dalam *Grasberg Igneous Complex* (GIC), menciptakan rekahan yang terbuka di dekat kontak. Sulfur yang tereduksi bereaksi dengan besi (Fe) dan mempresipitasi pirit pada bukaan yang ada. Residu yang tidak larut dan pecahan batuan beku terakumulasi pada bukaan. Hidrogen bebas yang dihasilkan oleh presipitasi pirit bereaksi dengan H_2SO_4 untuk menghasilkan sulfur yang tereduksi lebih dengan reaksi:



Reaksi berantai ini menghasilkan pirit yang lebih banyak lagi. Bukaan yang besar membuat *Grasberg Igneous Complex* (GIC) runtuh ke arah luar. Bukaan ini membuat fluida mengalir kembali ke dalam *Grasberg Igneous Complex* (GIC). Fluida hidrotermal di *Grasberg Igneous Complex* (GIC) tersebut berhasi membentuk mineral magmatik primer (plagioklas dan k-felspar) pada bagian atas dan tepi luar *Grasberg Igneous Complex* (GIC). Proses perekahan ekstensional yang berulang menyebabkan pembentukan *Heavy Sulfide Zone* ke arah dalam, meninggalkan batuan yang dulunya menjadi batas dari *Grasberg Igneous Complex* (GIC) terpisah oleh pirit masif. Di bagian yang temperaturnya lebih rendah pada bagian atas dan tepi luar *Heavy Sulfide Zone*, galena dan salerit terpresipitasi.

2.2 Korosi

Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat adanya reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungannya. Korosi diawali dengan reaksi hidrolisis yang mengakibatkan keasaman meningkat. Pada reaksi awal molekul air pecah menjadi ion H^+ dan OH^- . Ion OH^- berikatan dengan besi (Fe) membentuk Besi II Oksida ($Fe(OH)_2$) dan kemudian teroksidasi membentuk besi III oksida ($Fe(OH)_3$) yang menghasilkan endapan berwarna merah atau karat (Threthewey dan Chamberlain, 1991).

Terdapat dua faktor yang memengaruhi korosi yaitu jenis bahan (logam) dan lingkungan. Jenis bahan meliputi kemurnian bahan, struktur bahan, bentuk kristal, dan unsur yang terkandung dalam bahan. Baja merupakan logam transisi yang cenderung membentuk ion atau senyawa kompleks. Lingkungan dapat berasal dari udara, air, tanah, dan zat-zat kimia seperti asam. Selain itu, korosi juga dipengaruhi oleh pH, temperatur, ataupun bakteri pereduksi. Korosi dapat berjalan cepat ataupun lambat bergantung pada medium pengkorosifnya. Kerusakan yang disebabkan karena adanya korosi dapat berupa oksida logam, kerusakan permukaan logam secara morfologi, perubahan sifat mekanis, dan perubahan sifat kimia (Fontana, 1987).

2.2.1 Jenis-jenis korosi

Korosi terjadi tidak hanya melibatkan reaksi kimia, namun juga reaksi elektrokimia. Lingkungan dapat memicu perpindahan elektron dalam reaksi elektrokimia. Mekanisme korosi pada lingkungan terjadi dengan proses yang berbeda-beda tergantung reaksi dan pemicunya. Mekanisme korosi yang berbeda-beda akan menyebabkan korosi yang berbeda pula. Dasar umum untuk mengklasifikasikan korosi yaitu dari proses terjadinya korosi dan tampilan logam yang terkorosi, namun terkadang dibutuhkan pengamatan yang lebih seksama dengan menggunakan alat dengan perbesaran tertentu (Hassell et al., 2004).

Korosi dalam lingkungan tambang bawah tanah diklasifikasikan menjadi dua bagian adalah sebagai berikut:

1. Korosi atmosfer (*atmospheric corrosion*)

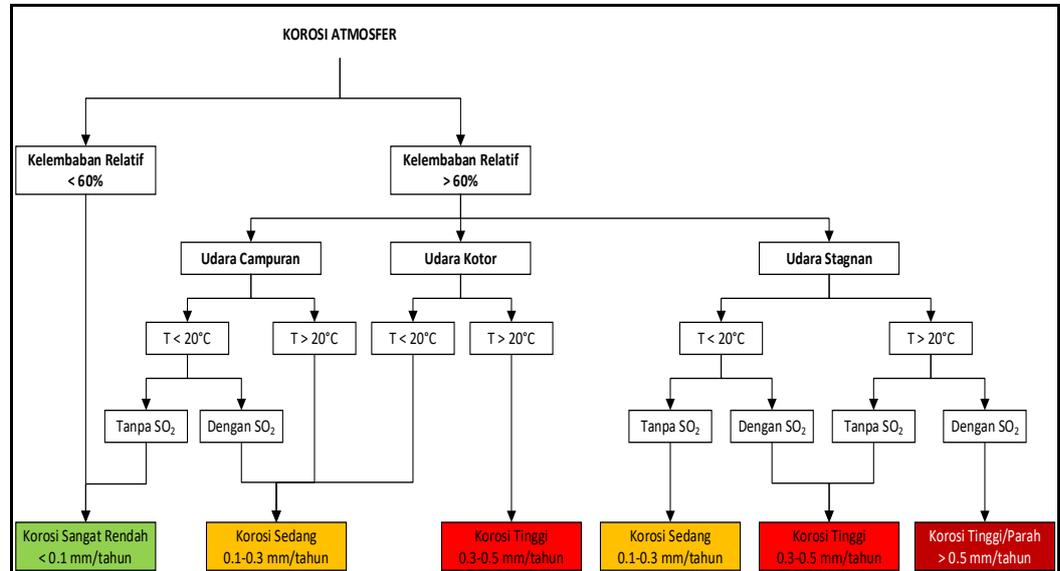
Korosi atmosfer adalah degradasi alami material yang terpapar udara dan polutannya. Laju korosi atmosfer dipengaruhi oleh kelembaban relatif (rasio jumlah uap air yang ada di atmosfer dengan jumlah saturasi pada suhu tertentu). Laju korosi meningkat melebihi kelembaban kritis lebih dari 60%. Korosi atmosfer lebih jauh ditekankan oleh adanya polutan seperti gas dan partikel. Semua kondisi ini sering hadir di tambang bawah tanah (Hadjigeorgiou et al., 2008).

Polutan udara, suhu atmosfer yang tinggi, dan kelembaban relatif yang tinggi umumnya dialami di tambang yang dapat meningkatkan korosi pada penyangga tanah yang terbuka seperti *mesh* baja, pelat, dan tali pengikat. Korosi atmosfer telah berkorelasi dengan konsentrasi polutan seperti knalpot diesel, gas peledakan, dan debu serta, suhu udara, kelembaban relatif, dan laju aliran udara (Dorion, 2013 dan Hassell et al., 2007).

Tingkat korosi telah terbukti dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10°C (Hassell et al., 2007). Namun, di atas sekitar 40°C kelembaban relatif cenderung turun, menghasilkan tingkat penurunan (Roberge, 2000). Kelembaban relatif ditemukan sangat memengaruhi laju korosi antara kelembaban relatif 60-100% dan korosi atmosfer tidak diamati di bawah kelembaban relatif 60%.

Laju aliran udara dan konsentrasi polutan dapat digabungkan menjadi tiga jenis udara yaitu udara buang, udara campuran, dan udara stagnan. Dari ketiga jenis udara tersebut, udara stagnan ditemukan menjadi yang paling korosif, diikuti oleh udara buangan. Kehadiran gas SO₂ juga ditemukan meningkatkan laju korosi (Dorion, 2013). Penilaian potensi korosi di seluruh tambang, akan sangat membantu jika memiliki konsep kisaran laju korosi yang mungkin dialami

berdasarkan hasil indentifikasi variabel lingkungan. Klasifikasi lingkungan korosif atmosfer dan perkiraan laju korosi seragam untuk baja karbon dapat dilihat pada Gambar 2.2.



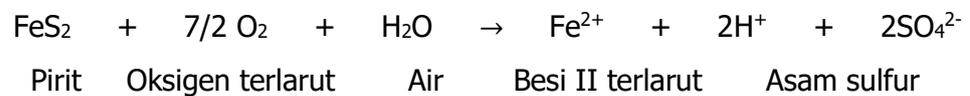
Gambar 2.2 Klasifikasi Lingkungan Korosif Atmosfer dan Perkiraan Laju Korosi Seragam Untuk Baja Karbon (Dorion, 2013).

2. Korosi air (*aqueous corrosion*)

Korosi karena keberadaan air tanah secara signifikan lebih agresif daripada korosi atmosfer dan hanya terjadi ketika penguatan dan penyangga bersentuhan langsung dengan air tanah. Variabel berair yang memengaruhi korosifitas air berupa oksigen terlarut (DO), pH, temperatur, salinitas (spesies ion agresif seperti sulfat, klorida, besi, tembaga kemungkinan ada di perairan salinitas tinggi), dan debit atau kecepatan air. Kecepatan air menyebabkan aliran massa oksigen ke permukaan logam, kecepatan yang tinggi dapat menyebabkan erosi produk korosi mengurangi perlindungan (Silaen dan Budiman, 2017).

Dalam kasus paparan baja pada air asam, pH dan suhu adalah faktor utama yang memengaruhi laju korosi, dengan pH rendah dan suhu tinggi menghasilkan tingkat korosi tertinggi (Roberge, 2008). Selain korosi seragam yaitu bahkan korosi pada permukaan baja, kondisi asam juga lebih cenderung menghasilkan

mekanisme korosi yang sangat lokal yang disebut *stress corrosion cracking* yang merupakan hasil dari konsentrasi ion hidrogen yang tinggi yang dapat mempromosikan *hydrogen embrittlement of steel* (Gamboa and Atrens, 2003). Keterdapatannya mineral sulfida yang teroksidasi, akan menciptakan kondisi asam yang terlokalisasi dan membuat sel korosi elektrokimia dengan penguatan batuan. Kondisi pH yang lebih rendah berkorelasi dengan laju korosi yang lebih tinggi (Silaen dan Budiman, 2017). Reaksi pembentukan asam adalah sebagai berikut:



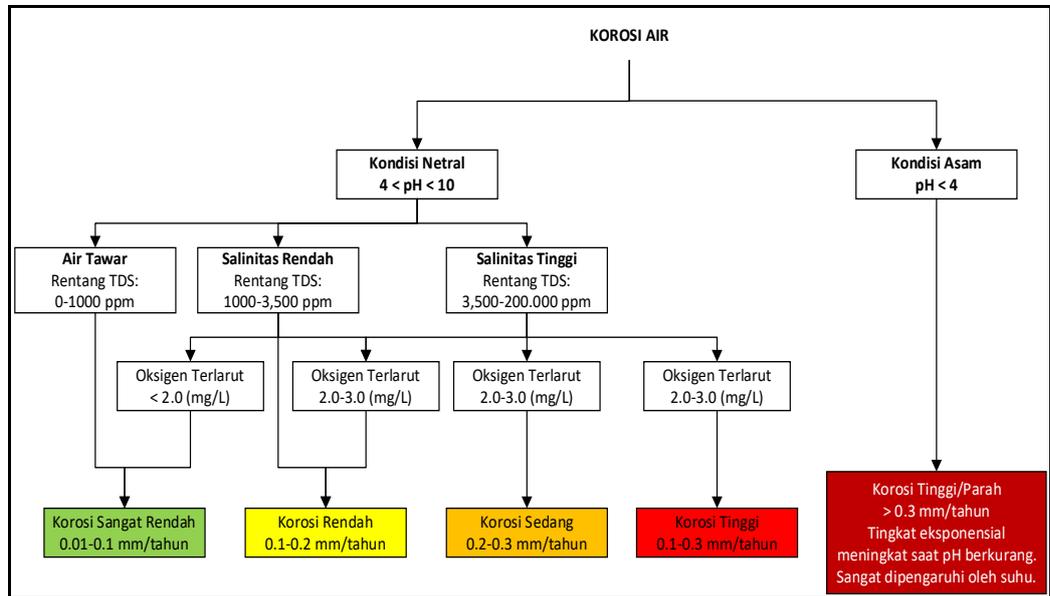
Korosi dengan air pH netral terutama dikendalikan oleh salinitas (diukur sebagai total padatan terlarut (TDS) atau dengan konduktivitas sebagai proksi) dan oksigen terlarut (DO) (Hassell et al., 2007 dan Dorion, 2013). Namun, keberadaan spesies ion agresif tertentu (klorida, sulfat, besi, dan tembaga) dapat menyebabkan korosi lubang yang cepat dan terlokalisasi (Schweitzer, 2007).

Ada dua jenis korosi berdasarkan tempat korosi tersebut dapat terjadi adalah sebagai berikut (Silaen dan Budiman, 2017):

1. Korosi permukaan, terjadi pada *mesh, plate*, kepala baut dari kabel atau rebar, *steel set, shaft*, dan lain-lain. Hasil keterpaparan dari atmosfer yang buruk dan kondisi air.
2. Korosi bawah permukaan, terjadi pada kabel atau baut atau rebar yang digROUT, ketika keretakan kolom NAT terjadi karena enkapsulasi NAT yang buruk atau karena gerakan tanah atau getaran atau kerusakan ledakan di mana air tanah meresap melalui celah dan mendorong korosi.

Penilaian potensi korosi di seluruh tambang, akan sangat membantu jika memiliki konsep kisaran laju korosi yang mungkin dialami berdasarkan hasil indentifikasi

variabel lingkungan. Klasifikasi lingkungan korosif berair dan perkiraan laju korosi seragam untuk baja karbon dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Klasifikasi Lingkungan Korosif Berair dan Perkiraan Laju Korosi Seragam Untuk Baja Karbon (Roy et al. 2016).

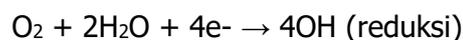
2.2.2 Mekanisme terbentuknya korosi

Secara umum mekanisme korosi yang terjadi di dalam suatu larutan berawal dari logam yang teroksidasi di dalam larutan, dan melepaskan elektron untuk membentuk ion logam yang bermuatan positif. Larutan akan bertindak sebagai katoda dengan reaksi yang umum terjadi adalah pelepasan H_2 dan reduksi O_2 , akibat ion H^+ dan H_2O yang tereduksi. Reaksi ini terjadi dipermukaan logam yang akan menyebabkan pengelupasan akibat pelarutan logam ke dalam larutan secara berulang-ulang.

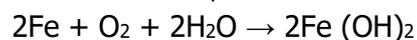
Reaksi korosi dapat digambarkan sebagai berikut (Silaen dan Budiman, 2017):



Dan

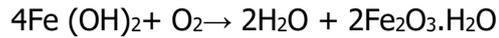


↓



Besi + Air dengan oksigen terlarut di dalamnya → Besi Hidroksida

Kemudian



Besi hidroksida + Oksigen → Air + Oksida besi terhidrasi (karat coklat)

2.2.3 Faktor yang memengaruhi proses korosi

Beberapa faktor lingkungan yang dapat memengaruhi proses korosi pada besi antara lain, yaitu:

1. Suhu

Kenaikan suhu akan menyebabkan bertambahnya kecepatan korosi. Hal ini terjadi karena makin tinggi suhu maka energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akan meningkat dan melampaui besarnya harga aktivasi dan akibatnya laju kecepatan reaksi (korosi) juga akan makin cepat, begitu juga sebaliknya (Fogler, 1992).

2. Kecepatan alir fluida atau kecepatan pengadukan

Laju korosi akan bertambah jika laju atau kecepatan aliran fluida bertambah besar. Hal ini karena kontak antara zat perekasi dan logam semakin besar, sehingga ion-ion logam semakin banyak yang lepas dan logam akan mengalami kerapuhan atau biasa disebut korosi (Kirk *and* Othmer, 1965).

3. Konsentrasi bahan korosif

Hal ini berhubungan dengan pH suatu larutan. Larutan yang bersifat asam sangat korosif terhadap logam dimana logam yang berada di dalam media larutan asam akan lebih cepat terkorosi karena merupakan reaksi anoda. Sedangkan larutan yang bersifat basa dapat menyebabkan korosi pada katodanya karena reaksi katoda selalu serentak dengan reaksi anoda (Djaprie, 1995).

4. Waktu kontak

Aksi inhibitor diharapkan dapat membuat ketahanan logam terhadap korosi lebih besar. Dengan adanya penambahan inhibitor ke dalam larutan, maka akan menyebabkan laju reaksi menjadi lebih rendah, sehingga waktu kerja inhibitor

untuk melindungi logam menjadi lebih lama. Kemampuan inhibitor untuk melindungi logam dari korosi akan hilang atau habis pada waktu tertentu, hal itu dikarenakan semakin lama waktunya maka inhibitor akan semakin habis terserang oleh larutan (Uhlig, 1958).

5. Oksigen

Adanya oksigen yang terdapat di dalam udara dapat bersentuhan dengan permukaan logam yang lembab. Sehingga kemungkinan menjadi korosi lebih besar. Di dalam air (lingkungan terbuka), adanya oksigen sehingga menyebabkan korosi cepat terjadi (Djaprie, 1995).

2.3 Penilaian Potensi Korosi di Tambang

Penilaian potensi korosi di tambang dari tahap pra-penambangan (pengembangan awal) untuk operasi tambang. Pendekatan ini melibatkan identifikasi potensi korosi berdasarkan luas tambang diikuti dengan program pengambilan sampel untuk mengembangkan hubungan spasial yang dapat dimasukkan ke dalam pemetaan bahaya (Bewick et al., 2019).

2.3.1 Identifikasi awal potensi korosi

Selama fase mengizinkan pengembangan tambang, banyak yurisdiksi mengharuskan tambang untuk memberikan perkiraan kualitas air selama umur tambang. Prakiraan ini meliputi pH air tambang dan keberadaan ion logam yang kadang-kadang dikarakterisasi menggunakan tes kinetik. Selain itu, karakterisasi geokimia dan metalurgi dari batuan sisa dan bijih yang diperlukan untuk perizinan dan perencanaan dapat memberikan wawasan berharga tentang lingkungan korosi potensial bila dikombinasikan dengan pengukuran kimia air awal. Dengan demikian, untuk identifikasi awal potensi korosi yang disebabkan oleh air di tambang, dimungkinkan untuk menggunakan karakterisasi kualitas air yang biasanya digunakan untuk proses perizinan.

Proses pengambilan sampel perlu ditambah untuk mengidentifikasi variabilitas spasial di seluruh tambang. Dalam hal korosi atmosfer, identifikasi awal potensi korosi itu menantang tetapi pemahaman dasar tentang jaringan ventilasi dan peralatan penambangan yaitu, diesel ataupun listrik dapat memberikan beberapa indikasi di mana korosi atmosfer mungkin menjadi perhatian misalnya, *drift* udara kotor di mana polutan terkonsentrasi (Bewick et al., 2019).

2.3.2 Pengambilan sampel atmosfer

Pengujian atmosfer mungkin kurang intensif dan harus fokus pada suhu dan kelembaban relatif. Rencana ventilasi tambang kemudian harus ditinjau untuk mengidentifikasi area udara campuran, udara buangan, dan udara stagnan. Pengambilan sampel dapat dilakukan untuk menentukan konsentrasi kontaminan tetapi ini kurang penting (Bewick et al., 2019).

Polutan seperti sulfur dioksida (SO_2) bercampur dengan elektrolit yang menghasilkan asam sulfat. Kontaminan utama lainnya termasuk klorida atmosferik, senyawa nitrogen dan partikel debu. Proses peledakan dan penggunaan peralatan diesel adalah sumber utama kontaminan ini, yang lebih terkonsentrasi karena sistem ventilasi terbatas, terutama pada saluran udara balik (Hassel et al., 2004).

2.3.3 Pengambilan sampel air

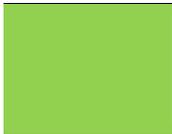
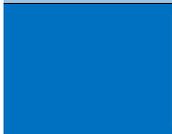
Setelah penambangan sedang berlangsung, program pengambilan sampel untuk mengidentifikasi potensi spasial untuk korosi di dalam sebuah tambang dan laju yang mungkin harus dilaksanakan pada frekuensi untuk secara memadai menangkap perubahan kondisi (evolusi aliran air tanah dan kualitas air). Alur kerja dasar dari program pengambilan sampel air adalah sebagai berikut (Bewick et al., 2019):

1. Catat lokasi dan waktu penilaian.
2. Catat kondisi air tanah.
3. Di mana air tanah diamati, kumpulkan sampel dan TDS, DO, temperatur, pH.

4. Cadangan sejumlah sampel air untuk analisis laboratorium.

Pengambilan sampel air harus dilakukan di seluruh area penambangan dengan fokus pada mengidentifikasi daerah-daerah dengan perubahan laju aliran, geologi lokal, dan geologi yang berdekatan di mana air dapat mengalir. Laju aliran air tanah dapat diklasifikasikan menggunakan kategori seperti yang dinyatakan dalam *Rock Mass Rating System* (RMR) (Bieniawski, 1989). Kondisi air tanah ditentukan dengan mengamati atap dan dinding terowongan secara visual. Kemudian kondisi air tanah yang ditemukan dapat dinyatakan sebagai keadaan umum seperti kering (*dry*), lembab (*moist*), basah (*wet*), terdapat tetesan air (*dripping*), atau terdapat aliran air (*flowing*). Pengamatan terhadap kondisi aliran dapat dilakukan berdasarkan debit rembesan air tanah dalam galor per menit (gpm) atau sama dengan 3,79 liter per menit setiap 10 m panjang terowongan. Klasifikasi remebesan air tanah menurut Bieniawski (1989) dapat dilihat pada Tabel 2.1. Pada Tabel tersebut, kolom legenda menunjukkan warna-warna yang akan digunakan untuk menggambarkan kondisi air tanah pada suatu peta.

Tabel 2.1 Klasifikasi Rembesan Air (Bieniaswski, 1989 dalam Silaen dan Budiman, 2017).

Legenda	Rembesan (durasi per 10 m)	Keterangan
Putih	Tidak ada	Kering
	<3 gpm	Lembab - Massa batuan berubah warna. Terdapat rembesan yang sangat sedikit.
	3-6 gpm	Basah - Massa batuan berubah warna. Terdapat rembesan dalam jumlah sedang melalui rekahan.
	6-30 gpm	Tetesan air- Terdapat banyak sekali rembesan dan menetes melalui rekahan.
	30-300 gpm	Aliran air - Air mengalir dari fraktur atau patahan.

Ketika aliran air tanah yang cukup ditemui sehingga sampel dapat dikumpulkan, dimana digunakan untuk mengukur indikator kunci dari korosi air potensial yaitu oksigen terlarut (DO), TDS (kadang-kadang diukur sebagai konduktivitas), suhu dan, pH. Selain itu, sejumlah sampel air harus disediakan untuk pengujian laboratorium untuk mengidentifikasi keberadaan ion agresif yang dapat berkontribusi pada korosi lubang yang lebih cepat (klorida, sulfat, besi, dan tembaga). Kehadiran ion agresif harus diverifikasi di awal pengembangan tambang dan ketika perubahan aliran berubah atau jika kegagalan penyangga tanah diamati (Bewick et al., 2019).

Berikut ini penjelasan dari beberapa variabel air tanah yang memengaruhi korosifitas air meliputi (Hassel et al., 2004):

1. Oksigen terlarut, merupakan salah satu faktor terpenting yang memengaruhi korosi logam dalam sistem air tambang. Ini signifikansi terletak pada kenyataan bahwa itu adalah reaktan katodik yang paling umum hadir di perairan alami. $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Konsentrasi oksigen dalam air laut pada suhu sekitar adalah sekitar 8 mg/l. Garam dan suhu terlarut sering mengontrol konsentrasi oksigen.
2. pH, kontrol yang diberikan nilai pH pada korosifitas suatu sistem sangat tergantung pada kelarutan produk korosi (biasanya oksida) yang terbentuk pada permukaan logam. Dalam kondisi normal, laju korosi baja tidak tergantung pada nilai pH antara 4,5 dan 10.
3. Kecepatan air, karena kecepatan menyebabkan aliran massa oksigen ke permukaan logam, dan korosi bergantung pada konsentrasi oksigen, laju korosi akan meningkat dengan peningkatan kecepatan air. Kecepatan air yang tinggi juga dapat menyebabkan erosi produk korosi sehingga mengurangi sifat protektifnya.
4. Klorin dan sulfat, anion yang agresif di dalam air seperti klorida dan sulfat meningkatkan laju korosi dengan menurunkan resistivitas listrik sel-sel korosi dan

memainkan peran penting dalam penetrasi dan pemecahan lapisan pelindung yang mungkin terbentuk pada permukaan logam.

2.3.4 Kualitas massa batuan

Kualitas massa batuan secara tidak langsung memengaruhi potensi korosif lingkungan tambang. Struktur massa batuan terutama penting karena memberikan saluran untuk tanah dan mengisi aliran air. Struktur geologis utama seperti patahan dan rekahan memungkinkan aliran air tanah ke dalam tambang dari akuifer di sekitarnya. Luasnya area yang dipengaruhi oleh air meningkat dengan adanya set sambungan yang saling berhubungan dan saling melebar, yang memungkinkan air tanah mengalir dan menghilang pada jarak yang signifikan dari sumber. Pembukaan lubang bukaan dapat terjadi selama penggalian awal atau kemudian di kemudian hari karena peledakan atau perubahan *stress*.

Mineralogi yang terkait dengan massa batuan yang berbeda diperkirakan tidak memengaruhi potensi korosi suatu lingkungan. Mineral umumnya lembab dan tidak meningkatkan proses korosi dengan cara utama. Pengecualian untuk ini adalah untuk mineral sulfida. Mineral reaktif ini teroksidasi, menciptakan kondisi asam yang sangat terlokalisasi serta mungkin menciptakan sel korosi elektrokimia dengan penguatan batuan. Ini dapat mempercepat korosi, namun kejadian seperti itu dianggap terlokalisasi (Hassel et al., 2004).

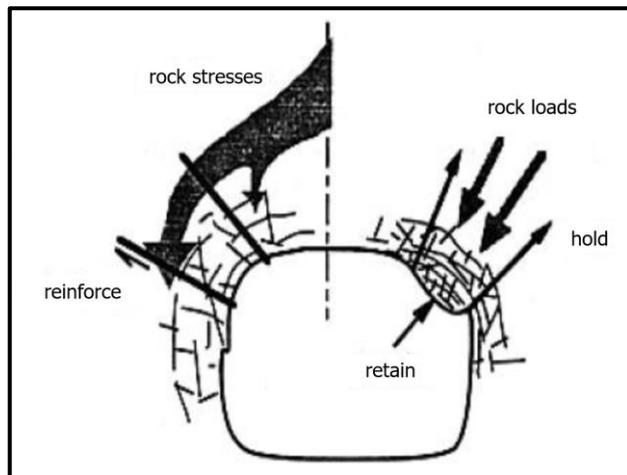
2.3.5 Kondisi penguatan dan penyangga

Kondisi penguatan dan sistem penyangga tergantung pada usianya, potensi lingkungan korosif dan jenis penguatan dan penyangga yang digunakan. Seringkali sulit untuk menilai kondisi tulangan, terutama untuk elemen enkapsulasi penuh dan resin. Menilai kondisi penyangga permukaan dan ekstrapolasi untuk memasukkan kondisi tulangan tidak disarankan. Permukaan galian dan massa batuan internal adalah dua lingkungan yang terpisah dengan laju dan bentuk korosi yang berbeda, di mana dan apa

jenis korosi yang terjadi pada elemen-elemen penguat, serta efektivitas enkapsulasi oleh *grout* resin dan semen (Hassel et al., 2004).

2.4 Penyanggaan Tambang Bawah Tanah

Secara definisi, penyanggaan (*ground support*) adalah alat bantu agar kondisi massa batuan dapat menyangga dirinya sendiri sehingga mencapai keseimbangan setelah adanya gangguan berupa lubang bukaan itu sendiri. Adapun fungsi dari penyanggaan (*ground support*) adalah sebagai penguat (*reinforcement*) dan penahan (*support*) pada batuan. Penentuan sistem penyanggaan yang akan dipasang di tambang bawah tanah harus memperhatikan beberapa kondisi seperti detail lubang bukaan, estimasi tegangan, data geologi, estimasi perilaku batuan, dan desain penyangga batuan itu sendiri (*static factor of safety, dynamic factor of safety*) (Ginting dkk., 2017).



Gambar 2.4 Fungsi Penyangga (Kaiser dan McCreath, 1992).

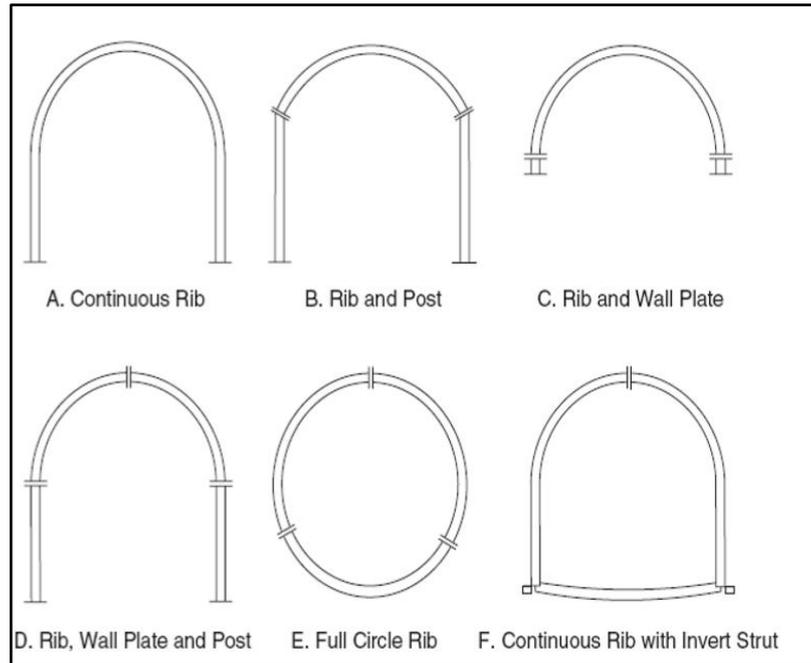
Ada tiga fungsi utama dari penyangga dapat dilihat pada Gambar 2.4 yaitu (Kaiser dan McCreath, 1992):

1. Pengikat (*hold*), yaitu penyangga batuan harus diikatkan pada suatu daerah yang kuat dan stabil. Penyangga dibebani secara prinsip oleh berat batuan yang disanggah.

2. Penahan (*retain*), yaitu penyangga batuan berfungsi sebagai penahan pada bagian yang tidak tertutupi, dan memaksimalkan dari masing-masing fungsi penyangga sehingga kerjanya maksimal untuk menahan beban dari batuan itu sendiri.
3. Penguat (*reinforce*), yaitu penyangga mempersatukan batuan secara tidak langsung, dan menaikkan ketahanan terhadap pelengkungan.

Terdapat beberapa jenis penyangga dalam pembuatan terowongan, seperti berikut ini:

1. *Shotcrete* merupakan beton yang disemprotkan untuk menambah kekuatan suatu permukaan. Beton yang digunakan sebagai *shotcrete*, memiliki karakteristik yang hampir sama dengan beton biasa. Hanya saja, modulus elastisitas beton yang digunakan sebagai *shotcrete* lebih rendah daripada beton biasa. Kekuatan *shotcrete* bertambah seiring dengan pertambahan umur *shotcrete*. Ketebalan *shotcrete* pada konstruksi terowongan, tergantung dari luas bukaan terowongan (Kolymbas, 2005).
2. *Rockbolt* adalah bahan batang yang terbuat dari baja, berpenampang bulat yang digunakan untuk menyangga massa batuan. Kekuatan *rockbolt* biasanya diukur dengan melaksanakan uji tarik (*pull test*) di lapangan. Berdasarkan *Handbook of Road Power* tahun 2006, kekuatan perkuatan ini ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya diameter, panjang, dan jarak antar *rockbolt* (Singh and Rajnish, 2006).
3. *Steel rib* merupakan salah satu jenis penyangga keonstruksi terowongan yang terbuat dari baja. Tipe *steel rib* dapat dilihat pada Gambar 2.5 (Singh and Rajnish, 2006).



Gambar 2.5 Tipe *Steel Rib* (Singh and Rajnish, 2006).

Penyanggaan bertujuan membantu dinding terowongan menyangga beban massa batuan dari atas dan samping terowongan, sehingga terowongan tetap stabil. Berdasarkan fungsinya, penyanggaan pada terowongan dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu (Dwiyanto, 1994):

1. Penyangga sementara (temporer).
2. Penyangga permanen.

Penyangga sementara biasanya digunakan pada saat berlangsungnya konstruksi terowongan sebelum dipasang penyangga yang permanen. Di samping itu, penggalian suatu terowong-uji (*test adit*) biasanya juga memerlukan penyangga sementara.

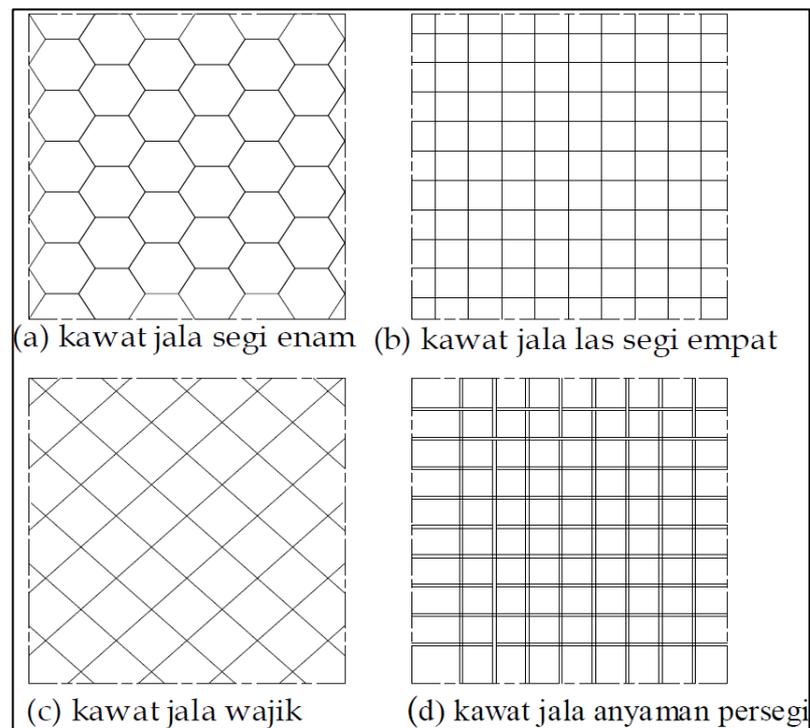
Jika ditinjau dari segi bahannya, maka penyangga dapat menggunakan salah satu atau gabungan dari bahan (Dwiyanto, 1994):

- a. Kayu.
- b. Baja.
- c. Beton monolit.
- d. Beton tembak (*shotcrete*) dan jaring kawat (*wiremesh*).

Penyangga jenis kayu lebih umum digunakan di tambang bawah tanah, sebab biasanya umur terowongan relatif singkat dan biaya harus ditekan serendah mungkin. Jenis penyangga yang lain digunakan pada terowongan sipil (Dwiyanto, 1994).

2.5 Wiremesh

Wiremesh adalah besi fabrikasi yang terdiri dari dua lapis kawat baja yang saling bersilangan tegak lurus. Setiap titik persilangan dilas secara otomatis menjadi satu, menghasilkan penampang yang homogen, tanpa kehilangan kekuatan dan luas penampang yang konsisten. Jarak antar kawatnya yang sama, seragam dan konsisten membuat besi *wiremesh* tidak akan pernah berkurang serta semua susunan selalu berada di posisinya masing-masing (Dewantari, 2010). Jenis-jenis bentuk *wiremesh* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Jenis-jenis *Wiremesh* (Soebandono dkk., 2011).

Wiremesh yang merupakan jaring kawat ini biasanya digunakan pada industri pertambangan untuk memperkuat *shotcrete* dan menempelkannya pada batuan dengan

diikat pada *bolt* yang dipasangkan *plate*. *Wiremesh* juga berfungsi sebagai bagian *ground support* yang memperluas bidang untuk menahan batuan jatuh. *Wiremesh* juga berfungsi untuk mencegah batuan jatuh dalam ukuran yang relatif kecil (Ginting dkk., 2017).



Gambar 2.7 *Wiremesh* (Ginting dkk., 2017).

2.6 Uji Kuat Tarik

Uji kuat tarik merupakan suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan atau material dengan cara memberikan beban gaya yang sesumbu (Askeland, 1985). Uji kuat tarik adalah cara pengujian bahan yang paling mendasar. Uji kuat tarik rekayasa banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan (Dieter, 1987).

Uji kuat tarik dilakukan karena beberapa alasan. Hasil pengujian kuat tarik digunakan dalam pemilihan bahan untuk aplikasi teknik. Sifat kekuatan tarik sering kali disertakan dalam spesifikasi bahan untuk memastikan kualitas. Sifat-sifat ini sering diukur selama pengembangan bahan dan proses baru, sehingga bahan dan proses yang berbeda dapat dibandingkan. Akhirnya, sifat kekuatan tarik sering digunakan untuk

menentukan perilaku suatu bahan dalam bentuk muatan selain tegangan uniaksial. Kekuatan material seringkali menjadi perhatian utama. Kekuatan kepentingan dapat diukur dalam hal tegangan yang diperlukan untuk menyebabkan deformasi plastis yang cukup besar atau tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh bahan. Ukuran kekuatan ini digunakan, dengan kehati-hatian yang tepat (dalam bentuk faktor keamanan), dalam desain teknik. Keuletan material merupakan ukuran seberapa banyak yang dapat dideformasi sebelum patah. Keuletan material termasuk dalam spesifikasi material untuk memastikan kualitas dan ketangguhan. Keuletan rendah dalam uji tarik sering disertai dengan resistansi rendah terhadap fraktur di bawah bentuk lain dari beban. Sifat elastis juga mungkin menarik, tetapi teknik khusus harus digunakan untuk mengukur sifat ini selama pengujian tarik, dan pengukuran yang lebih akurat dapat dilakukan dengan teknik ultrasonik (ASM, 2004).

Dari kurva uji tarik yang diperoleh dari hasil pengujian akan didapatkan beberapa sifat mekanik yang dimiliki oleh benda uji, sifat-sifat tersebut antara lain yaitu, kekuatan tarik, kuat luluh dari material, keuletan dari material, *modulus elastic* dari material, kelentingan dari suatu material dan ketangguhan (Dieter, 1993).

2.6.1 Kekuatan tarik

Kekuatan tarik merupakan beban maksimum yang dapat ditopang oleh suatu material tanpa patah saat diregangkan, dibagi dengan luas penampang asli material. Kekuatan tarik memiliki dimensi gaya per satuan luas dan dalam sistem pengukuran internasional biasanya dinyatakan dalam satuan pound per inci persegi (psi). Ketika tegangan kurang dari kekuatan tarik dihilangkan, material kembali sepenuhnya atau sebagian ke bentuk dan ukuran aslinya. Ketika tegangan mencapai nilai kekuatan tarik, bagaimanapun, material, jika ulet, yang sudah mulai mengalir secara plastis dengan cepat membentuk daerah terbatas yang disebut leher, di mana kemudian patah (Augustyn, 2011).

2.6.2 ASTM E8-04

Metode Uji ASTM E8-04 memungkinkan pengukuran dan pelaporan perpanjangan pada fraktur sebagai pengganti perpanjangan, seperti yang sering dilakukan dalam pengujian otomatis. Perhitungan kekuatan tarik dilakukan dengan cara membagi gaya maksimum yang dibawa oleh spesimen selama uji tegangan oleh luas penampang asli spesimen. Adapun prosedur pengujian sebagai berikut:

1. Langkah pertama, ukur dan dokumentasikan dimensi spesimen untuk menentukan luas penampang titik terkecil. Luas penampang asli digunakan untuk perhitungan tegangan.
2. Langkah kedua, jika tidak menggunakan ekstensometer, letakkan tanda pengukur pada sampel uji dengan panjang pengukur yang sesuai. Jarak antara tanda pengukur setelah spesimen putus digunakan untuk menentukan persen pemanjangan pada titik putus. Panjang pengukur harus sama.
3. Langkah ketiga, nolkan mesin uji.
4. Langkah keempat, pasang spesimen ke dalam gagang. Jika menggunakan ekstensometer, pasang ekstensometer pada sampel dan mulailah memuat spesimen.
5. Langkah kelima, jalankan pengujian sampai sampel gagal atau patah.
6. Langkah keenam, hapus sampel yang rusak. Jika menggunakan ekstensometer, perangkat lunak akan secara otomatis menghitung data elongasi, luluh dan modulus. Jika tidak menggunakan ekstensometer, pasangkan ujung yang retak dan ukur jarak antara tanda pengukur ke 0,05 mm (0,002 inci) terdekat.

2.7 Analisis Regresi

Analisis regresi sebagai kajian terhadap hubungan satu variabel yang disebut sebagai variabel yang diterangkan (*the explained variable*) dengan satu atau dua

variabel yang menerangkan (*the explanatory*). Variabel pertama disebut juga sebagai variabel terikat dan variabel kedua disebut juga sebagai variabel bebas. Jika variabel bebas lebih dari satu, maka analisis regresi disebut regresi linear berganda. Disebut berganda karena pengaruh beberapa variabel bebas akan dikenakan kepada variabel terikat (Gujarati, 2006).

Analisis regresi adalah suatu metode statistik yang mengamati hubungan antara variabel terikat Y dan serangkaian variabel bebas X_1, \dots, X_p . Tujuan dari metode ini adalah untuk memprediksi nilai Y untuk nilai X yang diberikan. Model regresi linier adalah model regresi yang paling yang hanya memiliki satu variabel bebas X. Analisis regresi memiliki beberapa kegunaan, salah satunya untuk melakukan prediksi terhadap variabel tak bebas Y. Model regresi linier ditunjukkan pada Persamaan 2.1 (Hijrani dkk, 2016).

$$y = a + bx \dots \dots \dots (2.1)$$

Y adalah variabel terikat yang diramalkan, X adalah variabel bebas, a adalah *intercept*, yaitu nilai Y pada saat $X=0$, dan b adalah *slope*, yaitu perubahan rata-rata Y terhadap perubahan satu unit X. Koefisien a dan b adalah koefisien regresi dimana nilai a dan b dapat dicari menggunakan persamaan 2.2 dan 2.3 (Hijrani dkk, 2016).

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$a = \frac{\sum y - b(\sum x)}{n} \dots \dots \dots (2.3)$$

Hasil analisis regresi linier menyatakan jika hubungan persamaan antara variabel bebas (X) dan variabel (Y) searah dan membentuk sebuah pola garis lurus. Jadi, jika nilai variabel (X) meningkat, maka nilai variabel (Y) juga meningkat. Begitu pula sebaliknya, jika antara (X) dan (Y) mengalami hubungan yang negatif (Sudjana, 2006).

2.7.1 Koefisien korelasi

Koefisien korelasi adalah nilai yang digunakan untuk menentukan kuat atau tidaknya hubungan antara X dan Y. Hubungan antar variabel bisa bernilai positif ataupun

negatif. Hubungan X dan Y dikatakan positif apabila kenaikan (penurunan X) pada umumnya diikuti oleh kenaikan (penurunan) Y. Sebaliknya dikatakan negatif kalau kenaikan (penurunan) X pada umumnya diikuti oleh penurunan (kenaikan). Koefisien korelasi dapat dihitung dengan persamaan 2.4 sebagai berikut (Anas dan Sutrimo, 2016):

$$r = \frac{n \sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{[n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2][n(\sum Y_i^2) - (\sum Y_i)^2]}} \dots \dots \dots (2.4)$$

2.7.2 Koefisien determinasi

Koefisien determinasi merupakan proporsi varian Y yang diterangkan oleh pengaruh linier dari X. Koefisien determinasi merupakan nilai yang dipergunakan untuk mengukur besarnya sumbangan atau andil variabel X terhadap variasi atau naik turunnya Y (Supranto, 2004). Nilai koefisien determinasi dari regresi linier sederhana diperoleh dengan persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$R^2 = r^2 = \left(\frac{n \sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{[n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2][n(\sum Y_i^2) - (\sum Y_i)^2]}} \right)^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

Koefisien determinasi mempunyai kegunaan sebagai ukuran ketepatan suatu garis regresi yang diterapkan terhadap suatu kelompok data hasil observasi. Semakin besar nilai R² yang dimiliki suatu data maka semakin bagus atau tepat suatu garis regresi, sebaliknya semakin kecil nilai R² yang dimiliki suatu data maka semakin tidak tepat garis regresi untuk mewakili data hasil observasi. Kegunaan lain dari koefisien determinasi adalah untuk mengukur besarnya proporsi (presentase) jumlah variasi Y yang diterangkan oleh model regresi (Supranto, 2004).

2.7.3 Uji parsial

Uji parsial atau uji t digunakan untuk menguji seberapa jauh pengaruh variabel independen atau variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini secara individual

dalam menerangkan variabel dependen atau variabel tak bebas secara parsial (Ghozali, 2012). Nilai t dapat dihitung menggunakan persamaan 2.6.

$$t_{hitung} = \frac{b}{\sqrt{\frac{[n\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2] - b[n\sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)]}{n-p-1[n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2]}}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Sedangkan untuk nilai t_{Tabel} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7 dengan kriteria sebagai berikut:

$$t_{tabel} = t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dasar pengambilan keputusan yang digunakan dalam uji t, yaitu:

- a. Jika nilai probabilitas signifikansi > 0,05 maka hipotesis ditolak. Hipotesis ditolak mempunyai arti bahwa variabel bebas tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel tak bebas.
- b. Jika nilai probabilitas signifikansi < 0,05 maka hipotesis diterima.
- c. Hipotesis diterima mempunyai arti bahwa variabel independen berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen.