

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN TEMPERATUR
TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIS BASAL**

Disusun dan diajukan oleh

TOMI MANTIRRI'

D111171310



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN TEMPERATUR
TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIS BASAL**

Disusun dan diajukan oleh

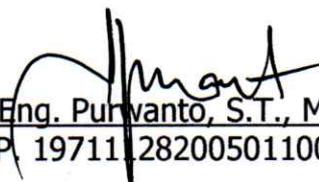
TOMI MANTIRRI'

D111171310

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 Juli 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

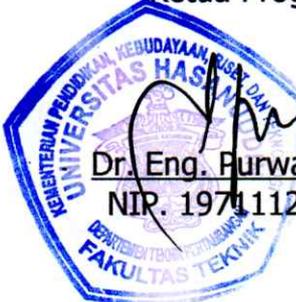

Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T.
NIP. 197111282005011002

Pembimbing Pendamping,


Nirmana Figra Qaidahiyani, S.T., M.T.
NIP. 199304222019032018

Ketua Program Studi,


Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T.
NIP. 197111282005011002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tomi Mantirri;
NIM : D111171008
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Sifat Fisik dan Mekanis Basal

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 Juli 2022

Yang menyatakan



Tomi Mantirri'

ABSTRAK

Potensi keterdapatan temperatur yang tinggi pada massa batuan dapat ditemukan pada berbagai macam konstruksi bawah tanah. PT XYZ merupakan salah satu perusahaan tambang bawah tanah yang memiliki sifat yang unik, yaitu terdapatnya sumber geotermal (air panas) dengan temperatur berkisar antara 50–80 °C yang mengalir di dinding terowongan penambangan. Pengaruh temperatur pada kondisi massa batuan seperti ini menjadi perhatian dalam konsep mekanika batuan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan temperatur yang tinggi pada batuan terhadap perubahan struktur permukaan, sifat fisik, dan sifat mekanis batuan. Sampel batuan pada penelitian ini adalah batuan basal sebelum dipanaskan (25 °C) dan sesudah dipanaskan (100 °C, 300 °C, 500 °C, dan 800 °C). Pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah pengamatan petrografi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM), uji sifat fisik, dan uji sifat mekanis serta menggunakan analisis statistik untuk mengetahui hubungan antara perubahan temperatur terhadap karakteristik batuan. Berdasarkan hasil pengamatan petrografi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM), sampel pada temperatur 25 °C dan 300 °C tidak menunjukkan keterdapatan retakan mikro pada batuan, sedangkan sampel pada temperatur 800 °C menunjukkan keterdapatan mikro yang cukup banyak. Hasil analisis regresi pengaruh temperatur terhadap karakteristik batuan basal, diketahui sifat fisik dan mekanis batuan mengalami perubahan seiring dengan peningkatan temperatur pemanasan batuan. Sifat fisik batuan yaitu densitas batuan mengalami penurunan, sedangkan porositas batuan mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan pemanasan sampel batuan. Sifat mekanis batuan yaitu nilai UCS dan modulus Young mengalami penurunan, sedangkan nisbah Poisson mengalami peningkatan.

Kata kunci: basal, konstruksi bawah tanah, temperatur tinggi, sifat fisik, sifat mekanis, *Scanning Electron Microscope* (SEM).

ABSTRACT

The potential for high temperature in a rock mass can be found in a variety of underground construction. PT XYZ is an underground mining company that has a unique characteristic, namely the presence of a geothermal (water heat) source with temperatures ranging from 50–80 °C flowing in the rock wall. The influence of temperature on rock mass conditions is a concern in the concept of rock mechanics. This research aims to determine the effect of high temperature changes in rocks on changes in surface structure, physical properties, and rock mechanical properties. The samples in this research were basalt before heating (25 °C) and after heating (100 °C, 300 °C, 500 °C, and 800 °C). The tests used in this research were petrographic observations using a Scanning Electron Microscope (SEM), physical properties tests, and mechanical properties tests and use statistical analysis to determine the relationship between temperature changes and rock characteristics. Based on the results of petrographic observations using a Scanning Electron Microscope (SEM), samples at a temperature of 25 °C and 300 °C did not show the presence of micro-cracks in the rock, while samples at a temperature of 800 °C showed quite a lot of micro-cracks. The results of the regression analysis of the effect of temperature on the characteristics of basalt rock, it is known that the physical and mechanical properties of the rock change along with the increase in the heating temperature of the samples. Physical properties of rock, namely rock density decreased, while rock porosity increased along with the increase in heating of samples. The mechanical properties of rock, namely the UCS value and Young's modulus, have decreased, while the Poisson ratio has increased.

Keywords: basalt, underground constructions, high temperature, physical properties, mechanical properties, Scanning Electron Microscope (SEM).

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan yang Maha Esa atas kasih serta anugerah-Nya yang begitu besar, bagaikan mata air yang selalu mengalir dan memberikan kehidupan, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul "Analisis Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Sifat Fisik dan Mekanis Batuan Basal". Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar (S1) pada Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Laporan ini membahas mengenai pengaruh perubahan temperatur pemanasan batuan terhadap sifat fisik dan mekanis batuan basal dengan melakukan pengujian skala laboratorium. Pada kesempatan yang berharga ini, dengan penuh rasa hormat penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dari awal penelitian hingga penyusunan laporan ini.

Terima kasih kepada bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama dan Ibu Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah membimbing penulis, bertukar pikiran mengenai topik penelitian, serta memberikan saran selama penelitian hingga penyusunan laporan ini. Terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Ir Muhammad Ramli, M.T. dan Ibu Dr.Eng. Rini Novrianti Sutardjo Tui, S.T., M.T., MBA selaku dosen penguji yang telah memberikan kritikan serta masukan dalam penyusunan laporan ini. Terima kasih kepada bapak/ibu dosen Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang telah mengajar dan memberikan materi selama perkuliahan. Terima kasih kepada staf administrasi Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin yang telah membantu penulis dalam pengurusan administrasi selama pelaksanaan penelitian ini.

Terima kasih dan rasa hormat penulis sampaikan kepada bapak Yusuf Sallo Mantirri dan Ibu Berta pawarrangan, selaku orang tua penulis, yang selalu mendoakan, memberi motivasi, serta mendukung setiap saat, hingga penulis bisa menyelesaikan studi dengan baik. Terima kasih kepada teman-teman seangkatan mahasiswa Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin Angkatan 2017 yang selalu memberi semangat serta memberi bantuan selama studi hingga penyusunan laporan ini. Terima kasih kepada anggota laboratorium Geomekanika yang telah membantu dan memberikan saran pada penelitian ini. Terima kasih kepada teman-teman komunitas gereja CG Evania yang telah mendoakan serta memberi semangat kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritikan terhadap laporan ini sangat diharapkan. Besar harapan penulis, laporan ini bisa bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya dan berguna untuk pengembangan ilmu pengetahuan mekanika batuan selanjutnya.

Makassar, Juli 2022

Tomi Mantirri'

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Lokasi Penelitian.....	4
1.7 Tahapan Penelitian	5
BAB II PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP KARAKTERISTIK BATUAN.....	9
2.1 Keterdapatan Sumber Geotermal pada Area Penambangan.....	9
2.2 Batuan Basal.....	10
2.3 Karakteristik Batuan.....	10
2.4 Pengamatan Petrografi.....	21
2.5 Penelitian Terkait Pengaruh Temperatur terhadap Karakteristik Batuan	23

	Halaman
2.6 Analisis Regresi Linear Sederhana	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Studi Literatur	29
3.2 Pengambilan Sampel.....	29
3.3 Pengambilan Data Uji Laboratorium.....	31
3.4 Analisis Data	45
BAB IV PENGARUH PERUBAHAN TEMPERATUR TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIS BATUAN BASAL	47
4.1 Data Uji Laboratorium.....	47
4.2 Analisis Data	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Ilustrasi batuan: (a) Kondisi natural batuan; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) kondisi batuan kering	11
2.3 Grafik keruntuhan batuan yang bersifat <i>brittle</i> dan <i>ductile</i> (Hudson and Harrison, 1997)	16
2.4 Mesin kuat tekan uniaksial (Laboratorium Geomekanika Universitas Hasaudddin).....	17
2.5 Kurva tegangan-regangan uji kuat tekan batuan uniaksial (Rai ddk., 2014)	18
2.6 Penentuan modulus elastisitas menggunakan kurva tegangan-regangan (Arif, 2016).....	20
2.7 Regangan aksial dan regangan lateral akibat pembebanan di sumbu aksial (Rai ddk., 2014).....	20
2.8 Diagram skematik fungsi dasar cara kerja <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) (Chen et al., 2015)	22
2.9 Hasil <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) (Li et al., 2020).....	23
2.10 (a) Batuan granit setelah dipanaskan pada suhu 1000 °C; (b) Ilustrasi retakan mikro yang terbentuk pada batuan setelah pemanasan 1000 °C (Wang et al., 2020)	26
3.1 Pengambilan sampel batuan	30
3.2 Alat preparasi (a) Pemotong batuan; (b) Bor inti; (c) Alat ukur.....	31
3.3 Proses preparasi sampel: (a) Pengeboran bongkahan batuan; (b) Pemotongan sampel uji kuat tekan; (c) Pemotongan sampel pengamatan petrografi.....	32
3.4 Proses pemanasan sampel batuan: (a) Tungku (<i>furnace</i>) tipe FO310; (b) Pemanasan sampel uji kuat tekan; (c) Pemanasan sampel pengamatan petrografi.....	33
3.5 Sampel batuan berdasarkan masing-masing temperatur (a) suhu 25 °C; (b) suhu 100 °C; (c) suhu 300 °C; (d) suhu 500 °C, (e) suhu 800 °C	34
3.6 Peralatan uji sifat fisik batuan: (a) Neraca Ohaus; (b) Sampel batuan; (c) Wadah berisi air; (d) Timbangan digital; (e) Desikator; (f) Pompa vakum; (g) Tali; (h) Oven	35
3.7 Penimbangan berat natural sampel.....	37

Gambar	Halaman
3.8 Perendaman sampel batuan uji sifat fisik.....	38
3.9 Menimbang berat gantung sampel.....	38
3.10 Proses pengeringan sampel batuan dalam oven	39
3.11 Peralatan uji kuat tekan uniaksial batuan: (a) Jangka sorong, (b) <i>safety goggles</i> , (c) <i>Hydraulic compressor machine</i> , (d) <i>Dial gauge</i> , (e) <i>Safety shoes</i>	40
3.12 Pengukuran dimensi sampel batuan uji kuat tekan uniaksial: (a) Pengukuran tinggi batuan uji; (b) Pengukuran diameter batuan uji	41
3.13 (a) Pemasangan <i>dial gauge</i> pada sampel batuan; (b) Posisi <i>dial gauge</i> yang telah terpasang.....	42
3.14 Kondisi batuan setelah pengujian: (a) 25 °C; (b) 100 °C; (C) 300 °C; (d) 500 °C; dan (e) 800 °C	43
3.15 Pengamatan petrografi: (a) Sampel pengamatan SEM; (b) Alat SEM ..	44
3.16 Diagram alir penelitian	46
4.1 Hasil <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) pada temperatur 25 °C, 300 °C, dan 800 °C.....	48
4.2 Perubahan struktur mineral kuarsa (<i>Shang et al., 2019</i>).....	48
4.3 Grafik pengaruh temperatur terhadap densitas natural batuan	58
4.4 Grafik pengaruh temperatur terhadap porositas batuan	60
4.5 Grafik pengaruh temperatur terhadap nilai kuat tekan uniaksial.....	61
4.6 Grafik pengaruh temperatur terhadap nilai modulus Young	62
4.7 Grafik pengaruh temperatur terhadap nilai nisbah Poisson	64

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2. 1	Klasifikasi kuat tekan batuan (Selby, 1993).....	16
2.2	Klasifikasi nisbah Poisson (Belyadi, 2019).....	21
2.3	Perubahan parameter mekanis batuan granit akibat pengaruh temperatur (Chen et al., 2012).....	24
2.4	Porositas dan kecepatan gelombang sampel batuan setelah dipanaskan (Chen <i>et al.</i> , 2017).....	25
2.5	Tingkat keeratan hubungan dua variabel berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sunyoto, 2012).....	28
4. 1	Densitas sampel batuan uji	49
4.2	Nilai derajat kejenuhan, porositas, dan nisbah rongga sampel uji.....	51
4.3	Nilai kadar air pada batuan	53
4.4	Hasil uji kuat tekan batuan basal	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT XYZ merupakan perusahaan tambang emas yang menerapkan sistem penambangan bawah tanah (*underground mining*). Lokasi penambangan PT XYZ berada di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Salah satu *site* penambangan PT XYZ memiliki sifat yang unik yaitu terdapatnya sumber geotermal (air panas) dengan temperatur berkisar antara 50–80 °C yang mengalir di dinding terowongan penambangan (*rock wall*). Keberadaan sumber geotermal tersebut diakibatkan oleh hasil kontak aktivitas vulkanis yang ada pada daerah tersebut dengan air meteorik yang berasal dari permukaan. Selain itu, juga diakibatkan oleh adanya kontak langsung antara penerobosan *dike* pada batuan pengikat yaitu basal yang menyebabkan tingginya suhu aliran air tanah (Suroto dkk., 2018). Keberadaan sumber geotermal tersebut dapat memengaruhi temperatur batuan disekitarnya, sehingga berpotensi menyebabkan ketidakstabilan konstruksi bawah tanah.

Pengaruh perubahan temperatur pada massa batuan menjadi perhatian dalam konsep mekanika batuan. Potensi keterdapatan temperatur yang tinggi pada massa batuan dapat ditemukan pada berbagai konstruksi bawah tanah, seperti pembangunan tempat penampungan limbah nuklir, *underground coal gasification*, konstruksi tambang bawah tanah, pembangunan pembangkit listrik geotermal, serta pengembangan konstruksi sipil bawah tanah (Ahmed *et al.*, 2021). Penentuan parameter mekanis dan fisik suatu batuan merupakan hal fundamental yang perlu diketahui ketika pembukaan konstruksi bawah tanah.

Penelitian mengenai pengaruh perubahan temperatur terhadap karakteristik batuan telah banyak dilakukan dengan objek kajian batuan yang berbeda-beda, seperti granit, batu pasir, marmer, dan batu gamping (Chen *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2009; Mao *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2017). Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa peningkatan temperatur pemanasan dapat menyebabkan perubahan sifat fisik dan sifat mekanis batuan. Menurut Mao *et al.* (2009), perubahan temperatur pemanasan (25–600 °C) batu gamping dapat mengakibatkan penurunan nilai kuat tekan dan penurunan nilai modulus elastisitas. Zhang *et al.* (2017) menemukan peningkatan porositas serta terbentuknya retakan mikro pada batuan seiring dengan peningkatan temperatur (25–800 °C) yang diberikan pada batu gamping. Berdasarkan hal tersebut, dapat diketahui bahwa peningkatan temperatur pada batuan memiliki sifat destruktif terhadap kekuatan batuan. Pengaruh sifat tersebut dapat menyebabkan ketidakstabilan pada pembangunan konstruksi bawah tanah.

Pengaruh temperatur yang tinggi pada massa batuan terhadap sifat fisik dan mekanis dapat diketahui dengan melakukan pengujian di laboratorium menggunakan sampel batuan yang diperoleh dari lapangan. Penelitian ini akan membahas mengenai perubahan struktur permukaan batuan setelah dipanaskan, serta besar pengaruh dan korelasi antara perubahan temperatur pada sampel batuan uji terhadap sifat fisik dan sifat mekanis. Sampel batuan uji pada penelitian ini menggunakan batuan basal. Batuan basal digunakan sebagai objek penelitian dikarenakan keberadaan sumber hidrotermal pada salah satu tambang bawah tanah yang terletak di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara yang memiliki litologi yaitu batuan basal (Suroto dkk., 2018). Selain itu, beberapa konstruksi bawah tanah yang memiliki potensi keterdapatan sumber geotermal dengan batuan penyusun (*host rock*) merupakan batuan basal (Elicia dkk., 2017). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh perubahan temperatur terhadap karakteristik batuan basal.

Penelitian ini menggunakan lima variasi temperatur, yaitu 25 °C, 100 °C, 300 °C, 500 °C, dan 800 °C. Penggunaan beberapa variasi suhu tersebut bertujuan untuk mengetahui secara luas pengaruh temperatur terhadap perubahan karakteristik batuan. Pemanasan batuan dilakukan selama enam jam dalam alat *furnace*. Penggunaan waktu tersebut disesuaikan dengan kapasitas alat yang digunakan dan juga mengacu kepada penelitian terdahulu yang telah dilakukan peneliti sebelumnya (Chen *et al.*, 2012). Setelah itu, dilakukan pengujian sifat fisik dan sifat mekanis batuan, pengujian sifat mekanis batuan pada penelitian ini menggunakan uji kuat tekan uniaksial. Selain itu, dilakukan juga pengamatan petrografi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui perubahan struktur batuan pada temperatur yang semakin meningkat.

1.2 Rumusan Masalah

Karakteristik batuan dapat dipengaruhi oleh tingginya temperatur dari sumber geotermal pada lokasi konstruksi bawah tanah, sehingga berpotensi menyebabkan ketidakstabilan pada konstruksi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui besar pengaruh dan korelasi antara perubahan temperatur terhadap karakteristik batuan basal.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perubahan struktur permukaan batuan basal sebelum pemanasan (temperatur 25 °C) dan setelah pemanasan 300 °C dan 800 °C.

2. Menganalisis perubahan sifat fisik dan mekanis batuan basal sebelum pemanasan (temperatur 25 °C) dan setelah pemanasan (temperatur 100 °C, 300 °C, 500 °C, dan 800 °C).

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sampel batuan uji pada penelitian ini tidak menggunakan batuan basal yang berasal dari lokasi ketersediaan sumber geotermal. Hal itu dikarenakan oleh keterbatasan akses dan akomodasi menuju lokasi tersebut.
2. Sampel batuan pada pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) hanya menggunakan sampel batuan pada temperatur 25 °C, 300 °C, dan 800 °C. hal itu dikarenakan pada penelitian ini hanya fokus pada ketersediaan retakan mikro batuan yang di sesuaikan dengan nilai kuat tekan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah hasil dari penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam pembangunan konstruksi bawah tanah yang berhubungan dengan geotermal pada daerah tersebut, sehingga dapat memastikan kestabilan konstruksi bawah tanah tetap aman.

1.6 Lokasi Penelitian

Lokasi pengambilan sampel secara administratif terletak di Kecamatan Parang Loe, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Stasiun pengambilan sampel terletak pada koordinat 5°15'24" S dan 119°35'3" E. Lokasi kesampaian pengambilan sampel ditempuh selama satu jam dari arah Kota Makassar. Stasiun pengambilan sampel mudah untuk dicapai karena terletak di pinggir jalan lintas kabupaten. Peta lokasi penelitian dapat

dilihat pada lampiran A. Selanjutnya, preparasi sampel dilakukan di *Workshop* Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin dan pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Geomekanika, Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin untuk uji sifat fisik, uji kuat tekan uniaksial, serta pengamatan petrografi dilakukan di laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian, Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin.

1.7 Tahapan Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan dimulai dari tahapan persiapan, pengambilan sampel, preparasi sampel, pemanasan sampel, pengujian sampel, pengolahan dan analisis data, hingga penyusunan laporan.

1. Persiapan

Tahapan persiapan merupakan kegiatan awal penelitian yang dilakukan untuk memperoleh informasi yang berkaitan dengan topik penelitian. Tahapan persiapan meliputi.

a. Studi Literatur

Studi literatur meliputi kegiatan mencari referensi-referensi yang berkaitan dengan topik penelitian. Referensi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh perubahan temperatur terhadap karakteristik batuan. Referensi yang digunakan bersumber dari buku teks, jurnal penelitian, artikel ilmiah, serta informasi terkait dari internet.

b. Perumusan Masalah, Tujuan Penelitian, dan Metode Penelitian

Perumusan masalah diketahui dari penelitian yang dilakukan oleh peneliti terdahulu. Penelitian tersebut berkaitan dengan pengaruh perubahan temperatur terhadap karakteristik batuan dengan objek batuan yang berbeda-

beda. Pengaruh tersebut dihubungkan dengan kondisi salah satu tambang bawah tanah di Indonesia yang memiliki suhu geotermal yang tinggi dengan litologi batuan penyusunnya adalah batuan basal. Berdasarkan rumusan masalah kemudian ditetapkan tujuan dilakukannya penelitian serta metode yang akan digunakan dalam penelitian.

2. Pengambilan Sampel Batuan Uji

Pengambilan sampel batuan dilakukan di daerah yang memiliki ketersediaan batuan basal. Sebelum dilakukan pengambilan sampel, terlebih dahulu dilakukan deskripsi secara makroskopis untuk memastikan jenis batuan yang akan diambil merupakan batuan basal. Sampel batuan yang diambil berupa bongkahan batuan yang memiliki dimensi yang sesuai untuk dilakukan preparasi.

3. Preparasi Sampel

Preparasi sampel batuan uji bertujuan untuk membentuk dimensi sampel yang sesuai dengan standar pengujian dan spesifikasi alat yang digunakan. Preparasi sampel uji kuat tekan batuan yaitu sampel berbentuk silinder dengan tinggi 84–86 mm dan diameter 42–44 mm. Preparasi uji sifat fisik menggunakan sampel hasil pecahan uji kuat tekan serta preparasi sampel untuk analisis petrografi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan dengan ukuran tebal 1 cm sebagai standar pengujian.

4. Pemanasan Batuan

Sebelum pengujian sampel batuan, dilakukan pemanasan batuan berdasarkan temperatur yang telah ditetapkan, yaitu temperatur 100 °C, 300 °C, 500 °C, dan 800 °C, untuk uji sifat fisik dan mekanis, sedangkan pengamatan petrografi menggunakan temperatur 25 °C, 300 °C, dan 800 °C.

5. Pengambilan Data

Kegiatan pengambilan data penelitian sebagai berikut.

- a. Pengujian sifat fisik batuan untuk mendapatkan parameter sifat fisik batuan, antara lain bobot isi, kadar air, derajat kejenuhan, porositas, dan nisbah rongga.
- b. Pengujian kuat tekan uniaksial untuk mendapatkan parameter sifat mekanis batuan, antara lain nilai kuat tekan, modulus elastisitas, dan nisbah Poisson.
- c. Pengamatan petrografi untuk mendapatkan perubahan struktur batuan (keterdapatannya retakan mikro) pada masing-masing temperatur menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

6. Pengolahan dan Analisis Data

Data Penelitian yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium akan diolah untuk mendapatkan sifat fisik, sifat mekanis, dan struktur mikroskopis permukaan batuan pada masing-masing temperatur. Selanjutnya dilakukan analisis data berdasarkan parameter-parameter yang telah ditetapkan. Tahapan pengolahan data sebagai berikut.

- a. Hasil pengujian sifat fisik berupa, berat natural, berat jenuh, berat kering, dan berat gantung dalam air, digunakan dalam menentukan parameter sifat fisik batuan.
- b. Data regangan lateral, regangan aksial, dan kuat tekan batuan diplot pada grafik untuk mendapatkan nilai kuat tekan batuan, modulus elastisitas, dan nisbah Poisson.
- c. Sampel yang telah dipreparasi kemudian dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* untuk mendapatkan gambaran mikroskopis permukaan batuan.

Analisis data pada penelitian ini menggunakan data yang diperoleh dari hasil pengujian berupa parameter sifat fisik dan mekanis pada masing-masing temperatur pemanasan batuan. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan

analisis regresi linear sederhana untuk mendapatkan hubungan antara pengaruh perubahan temperatur terhadap sifat fisik dan sifat mekanis batuan. Analisis petrografi pada penelitian ini dilakukan dengan mengamati retakan mikro yang ada pada permukaan sampel serta membandingkan kondisi permukaan sampel pada masing-masing temperatur.

7. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari penelitian. Data-data yang telah diperoleh, hasil analisis, serta kesimpulan penelitian yang diperoleh dari rumusan masalah kemudian disajikan dalam bentuk laporan. Laporan kemudian disusun berdasarkan format yang telah ditetapkan oleh Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin.

8. Seminar dan Penyerahan Laporan Tugas Akhir

Laporan hasil penelitian yang telah disusun kemudian dipresentasikan di hadapan dosen pembimbing, dosen penguji, serta peserta seminar dalam Seminar Tugas Akhir Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin. Tahapan selanjutnya dilakukan presentasi pada Ujian Sidang Sarjana Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin. Laporan yang telah dipresentasikan dan direvisi pada ujian sidang sarjana kemudian diserahkan ke Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin.

BAB II

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP KARAKTERISTIK BATUAN

2.1 Keterdapatan Sumber Geotermal pada Area Penambangan

PT XYZ merupakan perusahaan tambang emas yang berlokasi di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. PT XYZ menerapkan sistem penambangan bawah tanah dengan metode penambangan *underhand cut and fill*. *Underhand cut and fill* merupakan metode penambangan dengan cara menggali bukaan sebagai akses pengambilan bijih dan kemudian mengisi kembali terowongan tersebut dengan material pengisi (*filling material*). Salah satu pertimbangan pemilihan metode *underhand cut and fill* pada proses penambangan adalah cocok digunakan pada kondisi massa batuan yang buruk (Karim *et al.*, 2013).

Site penambangan PT XYZ memiliki karakteristik yang unik, yaitu adanya keterdapatan sumber geotermal (air panas) dengan temperaturnya berkisar antara 60–80 °C. Karakteristik endapan tubuh bijih emas hidrotermal di PT XYZ mempunyai tipe endapan epitermal. Endapan epitermal adalah hasil dari sistem hidrotermal yang berskala besar pada lingkungan vulkanik dalam suatu sumber panas magmatik. Umumnya endapan epitermal terbentuk pada suhu 50–250 °C. Karakteristik endapan bijih tersebut menyebabkan suhu yang tinggi pada lokasi tersebut. *Site* penambangan PT XYZ terletak pada jalur termal yang aktif dan berada satu jalur dengan air panas yang berada di sekitar 10 km di arah barat lokasi penambangan PT XYZ. Berdasarkan rencana penambangan yang telah dibuat, Pengembangan dan produksi tambang bawah tanah di PT XYZ akan terus memotong struktur-struktur geotermal (Suroto *et al.*, 2018). Litologi batuan pada lokasi penambangan PT XYZ salah satunya disusun oleh batuan basal.

2.2 Batuan Basal

Basal merupakan salah satu batuan beku ekstrusif vulkanik yang proses pembentukannya berasal dari pembekuan magma yang bersifat basa yang berada di dekat permukaan bumi. Menurut Wilson (1991) batuan basal dapat terbentuk pada posisi tektonik konvergen, divergen, di tengah lempeng samudera, ataupun di tengah lempeng benua dengan kenampakan vulkanik dan karakteristik seri magma yang berbeda-beda. Umumnya batuan basal berwarna abu-abu kehitaman dan memiliki keseragaman ukuran butir yang sangat baik disebabkan oleh proses pendinginan lava yang cukup cepat di permukaan bumi.

Menurut definisi, basal merupakan batuan beku afanitik yang memiliki komposisi kuarsa < 10%, *feldspathoid* < 10%, dan 65% felspar dalam bentuk plagioklas (Travis, 1995). Berdasarkan komposisi kimia, basal dibedakan menjadi dua jenis yaitu basal alkali dan basal *tholeiitic*. Perbedaan dari kedua tipe batuan basal tersebut dapat diketahui dari komposisi kandungan Na₂O dan K₂O. Untuk konsentrasi SiO₂ yang sama, basal alkali memiliki kandungan Na₂O dan K₂O lebih tinggi daripada basal *tholeiitic*. Menurut (Babievskaya *et al.*, 2009), komposisi kimia batuan basal adalah Fe₂O₃ (13,2–14,3%), TiO₂ (2,8–3,3%), CaO (9,9–11,8%), K₂O (0,53–1,3%), SiO₂ (<10%), Na₂O (0,62–2,5%), Al₂O₃ (11,8–12,7 %), P₂O₅ (0,57–0,65%), dan MgO (15–9,8%). Secara umum, batuan basal disusun oleh mineral-mineral, seperti piroksin, amfibol, plagioklas, dan gelas vulkanik.

2.3 Karakteristik Batuan

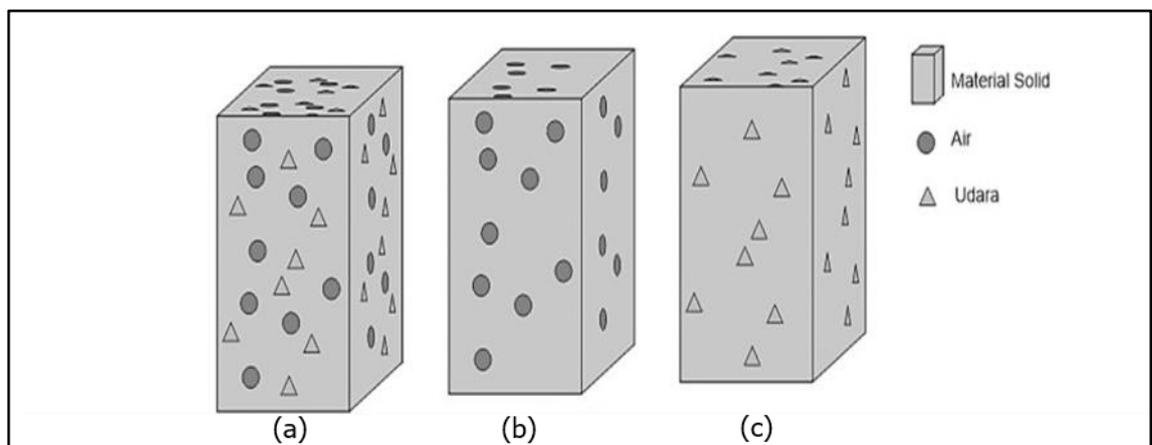
Batuan adalah campuran dari satu atau lebih mineral yang berbeda dan tidak mempunyai komposisi kimia tetap. Berdasarkan pengertian tersebut, batuan memiliki sifat atau karakteristik yang berbeda-beda bergantung pada komposisi dan struktur

penyusun batuan. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik batuan adalah peningkatan temperatur pada batuan tersebut. Peningkatan temperatur pada batuan dapat mengubah komposisi penyusun dan struktur batuan yang berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanisnya (Li *et al.*, 2020).

Secara garis besar dalam prinsip geomekanika batuan, karakteristik batuan dibagi menjadi dua, yaitu sifat fisik dan sifat mekanis. Sifat fisik dan mekanis batuan utuh digunakan dalam pengklasifikasian massa batuan untuk praktik rekayasa, seperti pekerjaan stabilisasi lereng, konstruksi terowongan, desain penyangga pada tambang bawah tanah, dan fondasi (Aladejare, 2021).

2.3.1 Sifat fisik batuan

Karakteristik suatu batuan sangat dipengaruhi oleh sifat fisik batuan itu sendiri. Perbedaan komposisi atau perbandingan antara, padatan, cairan, dan udara membuat perbedaan perilaku pada batuan yang kemudian berkaitan erat dengan kekuatan batuan saat dilakukan pengujian mekanis. Apabila berdasarkan hasil uji sifat fisik batuan, diperoleh ketidakseragaman nilai parameter sifat fisik, Hal itu dapat menjadi indikasi bahwa kekuatan batuan tersebut tidak seragam (heterogen) (Kim *et al.*, 2017).



Gambar 2. 1 Ilustrasi batuan: (a) Kondisi natural batuan; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) Kondisi batuan kering

Informasi mengenai sifat fisik suatu batuan dapat diketahui dengan melakukan pengujian *non-destructive* (tidak merusak) di laboratorium menggunakan sampel batuan yang diperoleh dari lapangan. Sampel uji sifat fisik tidak memerlukan preparasi khusus sehingga bisa menggunakan pecahan batuan hasil uji kuat tekan. Prosedur pengujian sifat fisik batuan mengacu pada ketentuan yang diatur dalam *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1977). Prosedur pengujian sifat fisik batuan adalah sebagai berikut (Arif, 2016).

1. Batuan ditimbang untuk mengukur berat asli (natural) batuan (W_n).
2. Batuan dijenuhkan dalam desikator selama 24 jam kemudian ditimbang (W_w).
3. Batuan jenuh ditimbang dalam kondisi tergantung dalam air (W_s).
4. Batuan dikeringkan dalam oven dengan suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.
5. Batuan ditimbang dalam kondisi kering (W_o).
6. Volume batuan tanpa pori-pori dihitung menggunakan rumus $W_o - W_s$.
7. Volume batuan total dihitung menggunakan rumus $W_w - W_s$.

Parameter sifat fisik yang digunakan dalam penyelidikan geoteknik antara lain, densitas (*density*), berat jenis (*specific gravity*), kadar air (*water content*), derajat kejenuhan (*degree of saturation*), porositas (*porosity*), dan nisbah rongga (*void ratio*). Berikut adalah penjelasan dari masing-masing sifat fisik batuan.

1. Densitas (*density*)

Densitas merupakan perbandingan antara massa suatu batuan dengan volume total (padat, cair, dan gas) batuan tersebut. Densitas suatu batuan dipengaruhi oleh komposisi unsur, ikatan internal batuan, dan porositas. Setiap batuan memiliki densitas yang berbeda-beda, batuan beku memiliki densitas yang meningkat dari batuan bersifat asam ke batuan yang bersifat basa, jika dibandingkan dengan jenis batuan lain. Batuan sedimen memiliki nilai densitas yang lebih kecil, sedangkan batuan metamorf umumnya memiliki densitas yang

paling besar (Schön, 2015). Densitas batuan dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan kondisi batuan sebagai berikut:

a. Bobot isi natural (*natural density*)

Bobot isi natural adalah perbandingan antara massa batuan dengan volume total pada kondisi natural atau belum diberikan perlakuan khusus.

$$\text{Bobot isi natural} = \frac{W_n}{W_w - W_s} \quad (2.1)$$

a. Bobot isi jenuh (*saturated density*)

Bobot isi jenuh adalah perbandingan antara massa batuan dengan volume pada kondisi telah dijenuhkan 24 jam.

$$\text{Bobot isi jenuh} = \frac{W_w}{W_w - W_s} \quad (2.2)$$

b. Bobot isi kering (*dry density*)

Bobot isi kering adalah perbandingan antara massa batuan dengan volume pada kondisi batuan telah dimasukkan ke dalam oven (kering) selama 24 jam.

$$\text{Bobot isi kering} = \frac{W_o}{W_w - W_s} \quad (2.3)$$

2. Berat Jenis (*specific gravity*)

Berat jenis merupakan perbandingan antara densitas padatan dengan densitas air. Perhitungan berat jenis dapat dilakukan dalam dua kondisi, yaitu:

a. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)

Berat jenis semu adalah perbandingan antara bobot isi padatan dalam batuan terhadap bobot isi air.

$$\text{Bobot jenis semu} = \frac{W_o}{\frac{W_w - W_s}{\text{bobot isi air}}} \quad (2.4)$$

b. Berat jenis sejati (*true specific gravity*)

Berat jenis sejati adalah nilai perbandingan antara bobot isi padatan dalam batuan terhadap bobot isi air yang terdapat dalam batuan setelah dioven.

$$\text{Berat jenis sejati} = \frac{\frac{W_o}{W_o - W_s}}{\text{bobot isi air}} \quad (2.5)$$

3. Kadar Air

Kadar air merupakan perbandingan antara massa air yang terkandung dalam batuan terhadap massa padatan batuan. Kadar air dibedakan atas dua berdasarkan kondisi batuan.

a. Kadar air jenuh

Kadar air jenuh adalah perbandingan antara massa air yang terkandung dalam pori-pori batuan dengan massa padatan batuan dalam kondisi jenuh.

$$\text{Kadar air jenuh} = \frac{W_w - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (2.6)$$

b. Kadar air natural

Kadar air natural adalah perbandingan antara massa air yang terkandung dalam batuan dengan massa total padatan dalam kondisi natural.

$$\text{Kadar air natural} = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (2.7)$$

4. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan adalah perbandingan antara kadar air natural dengan kadar air jenuh. Derajat kejenuhan menunjukkan jumlah kadar air yang terkandung dalam batuan kondisi natural dengan batuan dalam kondisi 100% pori-pori batuan diisi oleh air (Wong *et al.*, 2016)

$$\text{Derajat kejenuhan} = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\% \quad (2.8)$$

5. Porositas

Porositas adalah perbandingan volume rongga atau pori terhadap volume total seluruh batuan. Perbandingan ini biasanya dinyatakan dalam persen. Menurut Herastuti dan Nurmaya (2016), semakin kecil ukuran butir batuan, maka semakin kecil porositas batuan dan begitupun sebaliknya semakin besar ukuran butir batuan maka porositasnya semakin besar. Porositas menunjukkan kemampuan

untuk menyerap fluida pada batuan atau pori-pori batuan diisi oleh fluida di antara zat-zat padat atau mineral pada suatu batuan (Nurwidyanto, 2005).

$$\text{Porositas (n)} = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \quad (2.9)$$

6. Nisbah Rongga

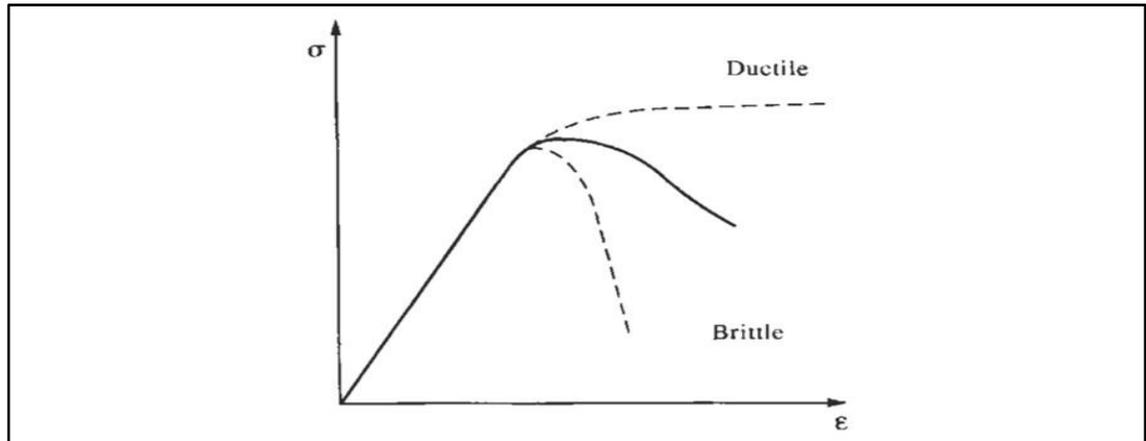
Nisbah rongga adalah perbandingan antara volume rongga pada batuan dengan volume padatan batuan.

$$\text{Nisbah rongga} = \frac{n}{1-n} \quad (2.10)$$

2.3.2 Uji Kuat Tekan Uniaksial (*Uniaxial Compressive Strength/UCS*)

Kuat tekan uniaksial batuan merupakan pengujian kekuatan batuan yang umumnya banyak digunakan dalam industri sipil dan pertambangan untuk memperoleh sifat mekanis batuan (Bieniawski, 1976). Tujuan utama pengujian kuat tekan batuan adalah untuk mengklasifikasi kekuatan dan karakterisasi batuan utuh. Hasil uji UCS berupa informasi kurva tegangan-regangan, kuat tekan uniaksial, modulus elastisitas, dan nisbah Poisson. Hasil nilai kuat tekan uniaksial batuan digunakan untuk memprediksi nilai modulus deformasi, klasifikasi massa batuan *Rock Mass Rating* (RMR), *Q-system* dan parameter kekuatan geser batuan (*shear strength*) (Bieniawski, 1989).

Pengujian kuat tekan batuan dilakukan dengan pemberian gaya tekan secara uniaksial pada sampel batuan hingga mengalami retak atau pecah. Tipe keruntuhan batuan pada uji kuat tekan uniaksial terbagi menjadi dua, yaitu *brittle* (batuan yang mengalami keruntuhan secara tiba-tiba) dan *ductile* (batuan yang menghasilkan deformasi pada batuan sebelum terjadi keruntuhan). Ciri batuan *ductile* dapat disebabkan keterdapatan retakan mikro maupun temperatur yang tinggi pada batuan. Grafik keruntuhan pada batuan ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik keruntuhan batuan yang bersifat *brittle* dan *ductile* (Hudson and Harrison, 1997)

Kuat tekan uniaksial merupakan perbandingan antara gaya maksimum batuan ketika pecah saat mencapai beban puncak (*peak load*) terhadap luas permukaan sampel (Rai dkk, 2014).

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

Keterangan:

σ_c = kuat tekan batuan uniaksial (MPa)

F = beban puncak pada saat pengujian (kN)

A = luas permukaan (mm²)

Klasifikasi kuat tekan batuan berdasarkan hasil nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dibedakan menjadi lima kelas sebagai berikut:

Tabel 2.1 Klasifikasi kuat tekan batuan (Selby, 1993)

Klasifikasi	Kuat tekan (MPa)
Sangat lemah	1–25
Lemah	25–50
Medium	50–100
Kuat	100–200
Sangat kuat	>200

Prosedur pengujian kuat tekan batuan mengikuti standar yang telah ditetapkan oleh *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1979). Secara teoretis penyebaran tegangan di dalam contoh batuan searah dengan gaya yang dikenakan pada contoh batuan tersebut (Arif, 2021).



Gambar 2.3 Mesin kuat tekan uniaksial (Laboratorium Geomekanika, Universitas Hasauddin)

Persyaratan kualitas batuan uji UCS (ISRM, 1981) yaitu

- a. Contoh batuan berbentuk silinder dengan rasio panjang dan tingginya (L/D) adalah 2–2,5. Sebaiknya, diameter contoh batuan uji tidak kurang dari 54 mm. Semakin besar perbandingan antara tinggi dan diameter contoh batuan yang digunakan, maka nilai kuat tekan batuan tersebut akan semakin kecil seperti ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini.
 - Menurut *American Society for Testing and Materials* (ASTM):

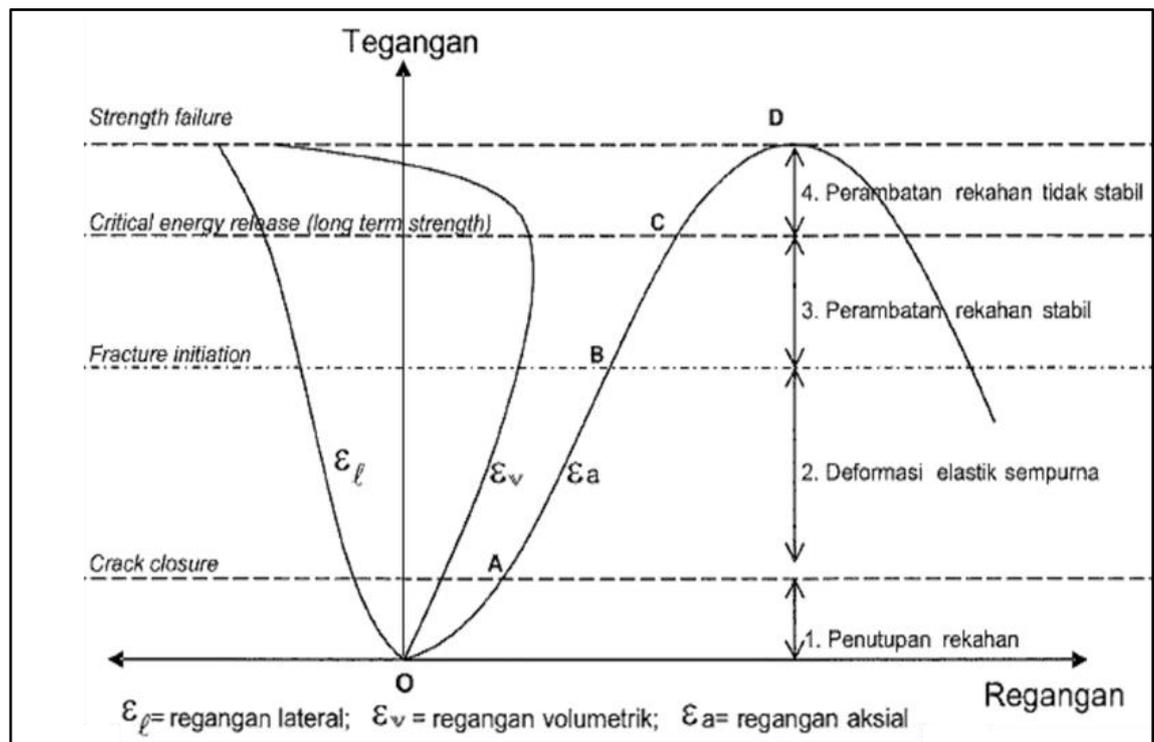
$$\sigma_c (L/D = 1) = \frac{\sigma_c}{0,778 + \frac{0,222}{L/D}} \quad (2.12)$$

- Menurut Protodyakonov

$$\sigma_c (L/D = 2) = \frac{8\sigma_c}{7 + \frac{L}{D}} \quad (2.13)$$

- Kedua muka batuan uji harus memiliki kerataan hingga 0,02 mm dan tidak melenceng dari sumbu tegak lurus lebih besar daripada 0,001 radian.
- Diameter batuan uji harus diukur tegak lurus dengan sumbu silinder di tiga tempat yaitu atas, tengah dan bawah dengan ketelitian 0,1 mm.
- Beban yang diberikan pada batuan harus secara kontinu pada laju tegangan konstan sehingga waktu untuk mencapai keadaan pecah yaitu 5–10 menit pembebanan. Sebagai alternatif laju pembebanan harus dalam batas 0,5–1,0 MPa s⁻¹.

Hasil pengujian kuat tekan digambarkan dalam kurva tegangan regangan (*stress-strain curve*). Kurva tersebut diperoleh dari hasil pengolahan data uji kuat tekan uniaksial batuan. Gambar 2.4 menunjukkan kurva tegangan-regangan pada pengujian kuat tekan batuan.



Gambar 2.4 Kurva tegangan-regangan uji kuat tekan batuan uniaksial (Rai ddk., 2014)

1. Modulus Elastisitas (*Modulus Young*)

Modulus elastisitas (*modulus Young*) merupakan kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastiknya ketika ditekan dari arah uniaksial. Sampel batuan yang diberikan beban uniaksial akan mengalami deformasi yaitu, deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis merupakan perubahan bentuk pada benda saat gaya bekerja dan deformasi batuan dapat kembali ke kondisi sebelumnya ketika gaya diiadakan sedangkan deformasi plastis merupakan perubahan bentuk benda yang bersifat permanen dan bentuk benda akan tetap meski gaya diiadakan. Nilai modulus Young dihitung berdasarkan kemiringan kurva tegangan-regangan pada bagian linear karena pada kondisi ini batuan mengalami kondisi elastis. Persamaan untuk menghitung nilai *modulus Young* adalah.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.14)$$

Keterangan:

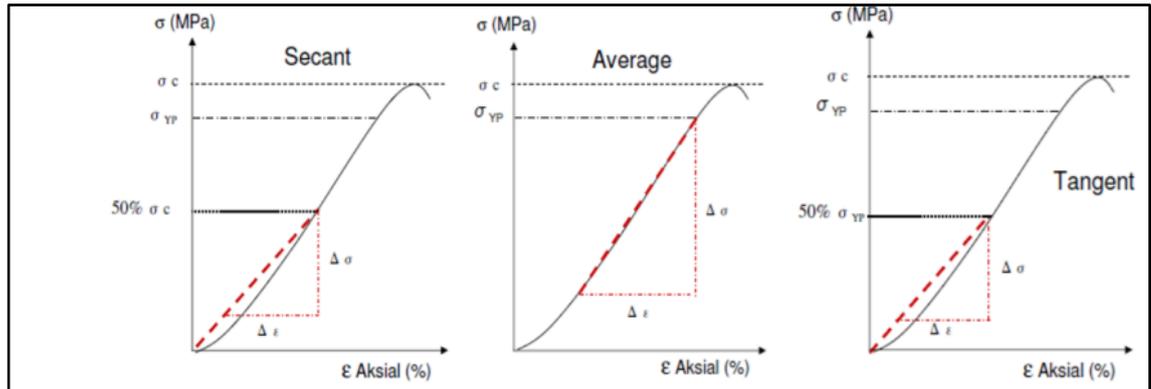
E = *modulus Young* (MPa),

$\Delta\sigma$ = beda tegangan (MPa)

$\Delta\varepsilon$ = adalah beda regangan aksial (%).

Terdapat tiga cara dalam penentuan nilai modulus elastisitas yaitu:

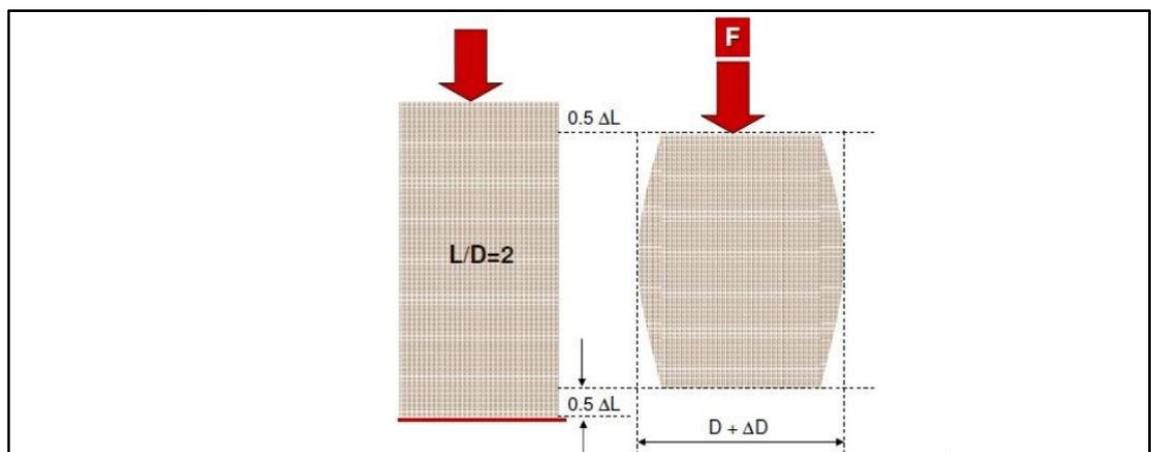
- a. Modulus elastisitas sekan (*secant Young's modulus*) yaitu modulus yang diukur dari tegangan = 0 sampai nilai tegangan mencapai 50%.
- b. Modulus elastisitas tangensial (*tangent Young's modulus*) yaitu modulus yang diukur pada tingkat tegangan yang tetap. Biasanya penentuan nilai modulus tangensial diambil dari titik awal bagian linear kurva hingga 50%.
- c. Modulus elastisitas rata-rata (*average Young's modulus*) yaitu modulus yang diukur dari rata-rata kemiringan kurva atau bagian linear terbesar dari kurva.



Gambar 2.5 Penentuan modulus elastisitas menggunakan kurva tegangan-regangan (Arif, 2016)

2. Nisbah Poisson

Nisbah Poisson (ν) merupakan nilai mutlak dari perbandingan antara regangan lateral terhadap regangan aksial. Ketika contoh batuan diberi beban pada sumbu aksial, maka contoh batuan tersebut akan mengalami regangan pada sumbu aksial dan sumbu lateral yang tegak lurus dengan sumbu aksial. Keadaan ketika contoh batuan mengalami perubahan dimensi saat diberi beban secara aksial dikenal dengan sebagai *efek Poisson*.



Gambar 2.6 Regangan Aksial dan regangan lateral akibat pembebanan di sumbu aksial (Rai dkk., 2014)

Persamaan nisbah Poisson adalah sebagai berikut.

$$\text{Poisson ratio } (\nu) = \frac{\epsilon_l}{\epsilon_a} = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.15)$$

Keterangan:

- ϵ_l = Regangan lateral (%)
 ϵ_a = Regangan aksial (%)
 d = diameter awal batuan uji (mm)
 Δl = perubahan panjang batuan uji
 l = Panjang awal batuan uji (mm)
 Δd = perubahan diameter batuan (mm)

Tabel 2.2 Klasifikasi nisbah Poisson (Belyadi, 2019)

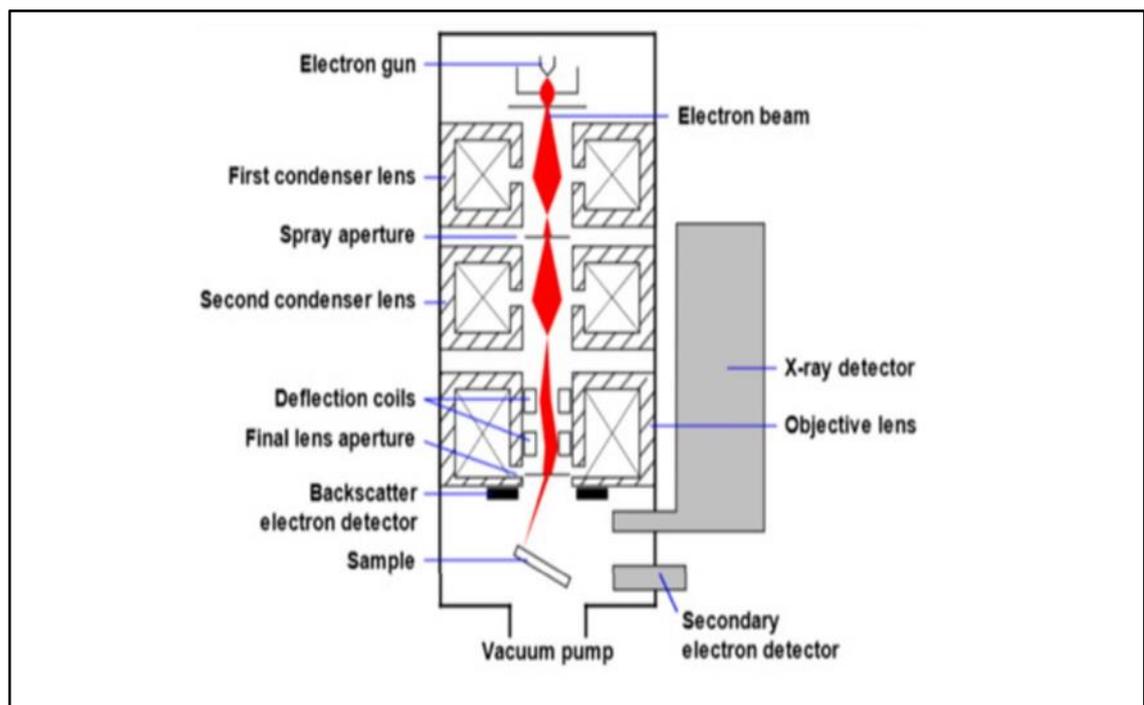
nisbah Poisson	Klasifikasi
$0 < \nu < 0,1$	Sangat Rendah
$0,1 < \nu < 0,2$	Rendah
$0,2 < \nu < 0,3$	Medium
$0,3 < \nu < 0,4$	Tinggi
$0,4 < \nu < 0,5$	Sangat Tinggi

Nilai nisbah Poisson sangat tergantung pada tingkat tegangan yang diberikan pada batuan. Selain itu, dipengaruhi juga oleh pembukaan dan penutupan rekahan dalam batuan saat pengujian. Nilai nisbah poisson bervariasi sesuai dengan deformasi yang dialami batuan (Arif, 2016).

2.4 Pengamatan Petrografi

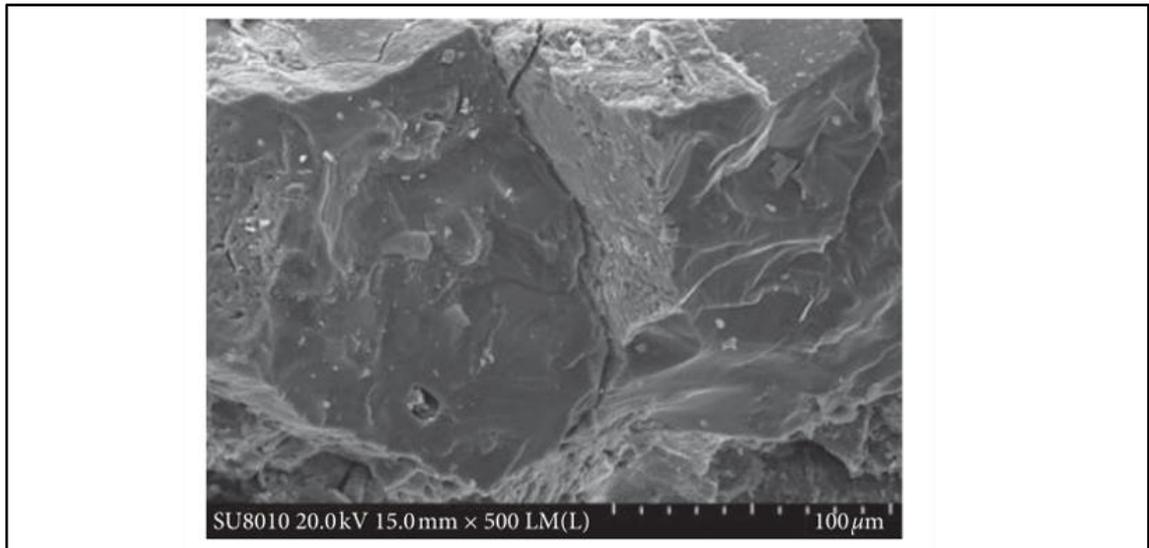
Petrografi adalah salah satu metode dalam petrologi yang secara khusus untuk menganalisis bentuk mikroskopis permukaan suatu batuan, kandungan mineral, dan struktur dalam batuan secara terperinci. Salah satu instrumen yang sering digunakan dalam analisis petrografi yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang digunakan untuk menganalisis retakan pada batuan secara mikroskopis (Zhao *et al.*, 2018). SEM

sangat cocok digunakan dalam situasi yang membutuhkan pengamatan permukaan batuan dengan pembesaran berkisar antara 20 kali sampai 300.000 kali. Mikroskop ini menggunakan metode elektrostatik dan elektromagnetik untuk mengontrol pencahayaan dan tampilan gambar serta memiliki kemampuan pembesaran objek dengan resolusi yang jauh lebih baik daripada mikroskop cahaya (Chen *et al.*, 2015). Gambar 2.7 menunjukkan skema dan cara kerja SEM.



Gambar 2.7 Diagram skematik fungsi dasar cara kerja *Scanning Electron Microscope* (SEM)(Chen *et al.*, 2015)

SEM terdiri dari sebuah senapan elektron yang memproduksi berkas elektron pada tegangan dipercepat sebesar 2–30 kV. Berkas elektron tersebut dilewatkan pada beberapa lensa elektromagnetik untuk menghasilkan gambar berukuran ± 10 nm pada sampel yang ditampilkan dalam bentuk film fotografi atau ke dalam tabung layar. Gambar 2.8 menunjukkan gambar hasil *Scanning Electron Microscope* pada batuan.



Gambar 2.8 Gambar hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) (Li et al., 2020)

2.5 Penelitian Terkait Pengaruh Temperatur terhadap Karakteristik Batuan

Penelitian mengenai pengaruh perubahan temperatur pada batuan telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan objek batuan yang berbeda-beda. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui bahwa perubahan temperatur pada batuan mengakibatkan terjadinya perubahan sifat fisik dan sifat mekanis batuan.

Perubahan karakteristik batuan akibat pengaruh perubahan temperatur bergantung pada suhu yang diberikan pada batuan tersebut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Chen *et al.* (2012) dengan objek batuan granit dengan pemanasan batuan hingga suhu 1.000 °C, diketahui nilai *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) mengalami penurunan sebesar 84,3% Ketika dipanaskan hingga suhu 1.000 °C. *Modulus Young* batuan granit tidak mengalami perubahan signifikan Ketika dipanaskan hingga pada suhu 400 °C, ketika dipanaskan hingga suhu 1.000 °C penurunan nilai modulus Young mengalami perubahan yang signifikan yaitu 94,51% dari kondisi natural batuan. Tabel 2.3 menunjukkan perubahan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas batuan berdasarkan suhu yang diberikan.

tabel 2.3 Perubahan parameter mekanis batuan granit akibat pengaruh temperatur (Chen *et al.*, 2012)

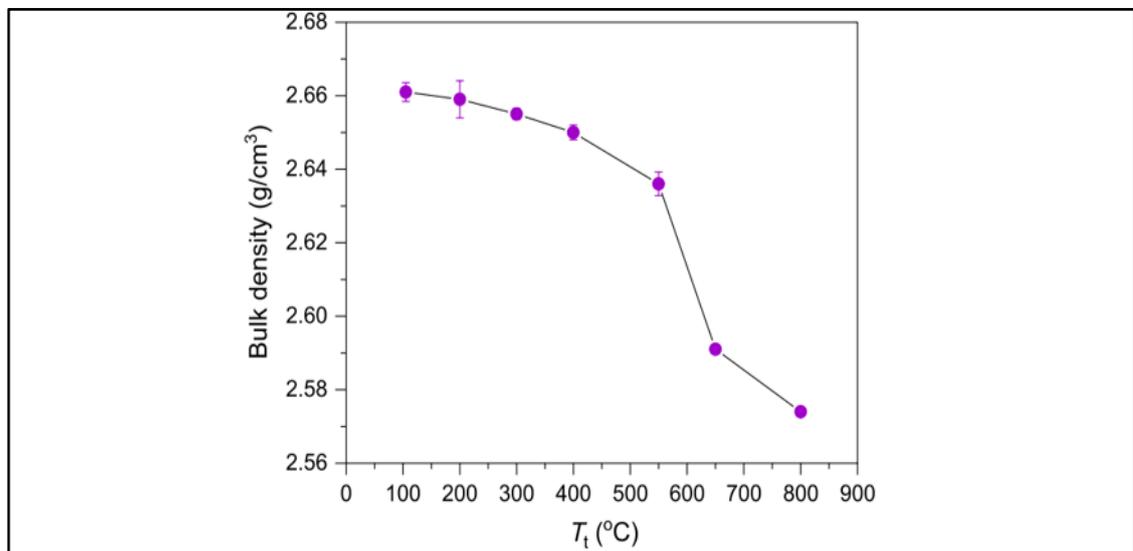
Kode sampel	Temperatur (°C)	UCS σ_c (MPa)	Rata-rata σ_c (MPa)	Modulus elastisitas E (GPa)	Rata-rata E (GPa)
U1	20	90,24		15,69	
U2	20	84,2	85,54	14,77	14,78
U3	20	81,66		13,88	
U4	200	75,5		15,61	
U5	200	73,62	76,19	14,26	14,48
U6	200	79,45		13,59	
U7	400	68,31		15,32	
U8	400	72,9	71,77	14,24	14,45
U9	400	74,1		13,8	
U10	600	38,52		7,12	
U11	600	31,74	25,54	6,92	7,39
U12	600	24,86		8,13	
U13	800	20,04		2,04	
U14	800	19,16	18,8	1,62	1,50
U15	800	17,2		0,85	
U16	1.000	10,8		1,57	
U17	1.000	12,6	13,41	0,48	0,81
U18	1.000	16,85		0,4	

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Chen *et al.* (2017) pada sampel batuan granit, ditemukan adanya perubahan porositas dan kecepatan rambat gelombang batuan setelah batuan dipanaskan pada suhu 700 °C.

tabel 2.4 Porositas dan kecepatan gelombang sampel batuan setelah dipanaskan (Chen *et al.*, 2017)

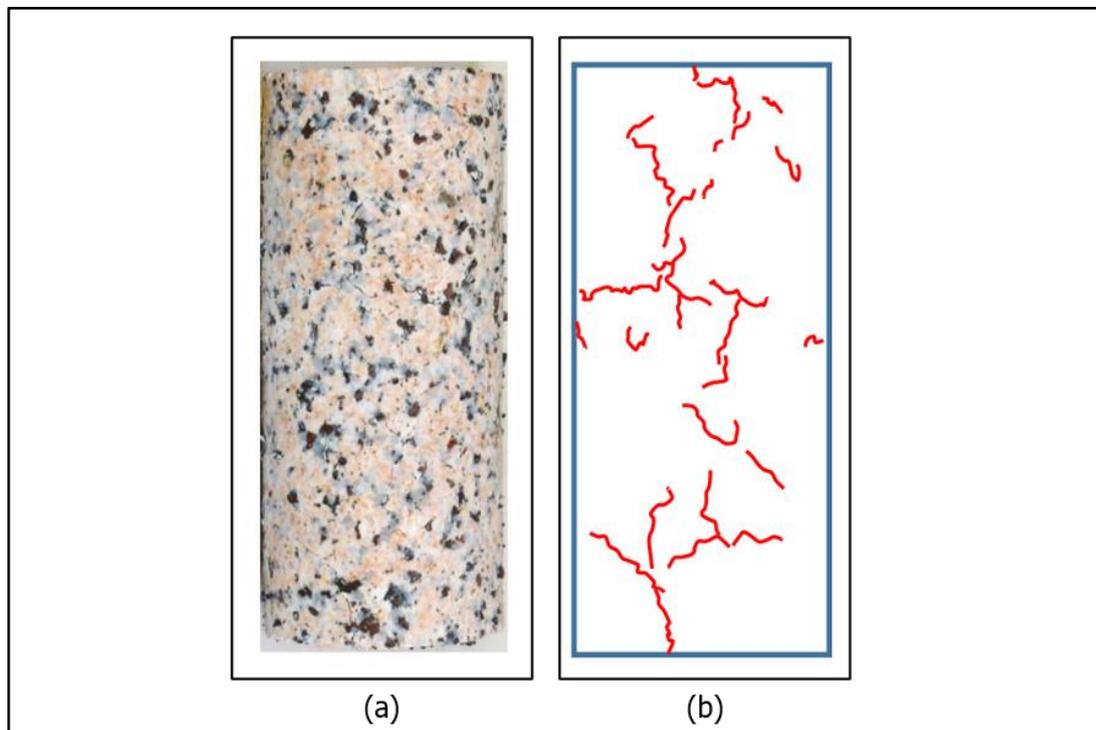
Temperatur (°C)	Porositas (%)	<i>p</i> -Wave velocity (m/s)
100	0,63	4142,32
200	0,82	3944,84
300	1,08	3883,98
400	1,26	3489,20
500	1,43	3094,41
600	2,98	1519,36
700	5,35	858,93

Berdasarkan Tabel 2.4, dapat diketahui bahwa peningkatan temperatur yang diberikan pada batuan menyebabkan terjadinya peningkatan porositas batuan, sedangkan kecepatan rambat gelombang batuan mengalami penurunan. Selain itu, peningkatan temperatur pada batuan juga menyebabkan penurunan densitas batuan. Gambar 2.9 menunjukkan perubahan densitas batuan setelah dipanaskan.



Gambar 2.9 Perubahan densitas akibat peningkatan temperatur pada batuan granit (Chen *et al.*, 2017)

Perubahan nilai kuat tekan, modulus elastisitas, porositas, kecepatan gelombang, dan densitas batuan disebabkan oleh adanya perubahan struktur pada batuan dengan terbentuknya retakan mikro yang menambah volume rongga batuan dan mengurangi kekuatan batuan. Perubahan karakteristik batuan juga dipengaruhi oleh perubahan komposisi mineral yang ada dalam batuan seiring dengan peningkatan temperatur yang diberikan pada batuan tersebut. Gambar 2.10 menunjukkan keberadaan retakan mikro pada batuan setelah dipanaskan hingga suhu 1.000 °C. Hal itu diakibatkan oleh adanya perubahan struktur mineral silika penyusun batuan (SiO_2) serta putusannya ikatan mineral-mineral yang mengandung unsur oksigen (O_2) (Wang *et al.*, 2020).



Gambar 2.10 (a) Batuan granit setelah dipanaskan pada suhu 1000 °C; (b) Ilustrasi retakan mikro yang terbentuk pada batuan setelah pemanasan 1000 °C (Wang *et al.*, 2020)

2.6 Analisis Regresi Linear Sederhana

Analisis regresi sederhana merupakan analisis statistik yang mempelajari hubungan antara dua variabel atau lebih. Dalam analisis regresi linear diasumsikan berlakunya bentuk hubungan linear dalam parameter. Analisis regresi linear yang paling sederhana adalah regresi linear dengan satu variabel independen (*independent variable*).

Analisis regresi ini digunakan untuk memprediksi seberapa jauh perubahan nilai variabel terikat, bila variabel independen dimanipulasi atau diubah. Persamaan umum regresi linear sederhana dinyatakan dalam persamaan 2.16 (Sugiyono, 2017).

$$Y = a + bX \quad (2.16)$$

Keterangan:

y = garis regresi/ *variable response*

a = konstanta (garis perpotongan dengan sumbu vertical)

b = konstanta regresi (*slope*)

X = variabel bebas/ *predictor*

Besarnya konstanta a dan b dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$a = \frac{(\Sigma y)(\Sigma x^2) - (\Sigma x)(\Sigma xy)}{n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (2.17)$$

$$b = \frac{n\Sigma xy - (\Sigma x)(\Sigma y)}{n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (2.18)$$

Koefisien korelasi (r) merupakan nilai yang menunjukkan keeratan nilai hubungan antara dua variabel yang saling berpengaruh. Persamaan umum koefisien korelasi adalah sebagai berikut.

$$r = \frac{n\Sigma xy - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{(n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2)(n\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2)}} \quad (2.19)$$

Rentang nilai nilai koefisien korelasi antara -1 sampai 1. Nilai koefisien korelasi yang positif menunjukkan kedua variabel memiliki hubungan yang searah atau berbanding lurus, sedangkan nilai koefisien korelasi negatif menunjukkan hubungan antara kedua variabel berlawanan arah atau berbanding terbalik. Rentang nilai ini dibagi berdasarkan tingkat keeratan hubungan dari dua variabel. Tabel 2.5 menunjukkan tingkat keeratan hubungan berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sunyoto, 2012).

Tabel 2.5 Tingkat keeratan hubungan dua variabel berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sunyoto, 2012)

Nilai koefisien korelasi	Tingkat hubungan
0,51–1,00	Kuat positif
0,01–0,50	Lemah positif
0	Tidak ada
(-0,01) – (-0,50)	Lemah negatif
(-0,51) – (-1,00)	Kuat negatif