

SKRIPSI

**PENGARUH RASIO UKURAN TINGGI DAN LEBAR SPESIMEN
MARMER TERHADAP NILAI KUAT TEKAN UNIAKSIAL DAN
APLIKASINYA PADA ANALISIS KEKUATAN PILAR**

Disusun dan diajukan oleh

WIHDAH

D111171005



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGARUH RASIO UKURAN TINGGI DAN LEBAR SPESIMEN
MARMER TERHADAP NILAI KUAT TEKAN UNIAKSIAL DAN
APLIKASINYA PADA ANALISIS KEKUATAN PILAR**

Disusun dan diajukan oleh

**WIHDAH
D111171005**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 10 Januari 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


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

NIP.197111282005011002


Nirmana Fiqra 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 : WIHDAH
NIM : D111171005
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Pengaruh Rasio Ukuran Tinggi dan Lebar Spesimen Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Uniaksial dan Aplikasinya pada Analisis Kekuatan Pilar

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain 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, 20 Januari 2022

Yang menyatakan



WIHDAH

ABSTRAK

Metode penambangan *room and pillar* merupakan metode penambangan bawah permukaan yang menyisakan sebagian material yang ditambang sebagai penyangga lubang bukaan. Kestabilan lubang bukaan pada metode penambangan *room and pillar* dipengaruhi oleh dimensi lubang bukaan dan dimensi pilar penyangga. Pilar yang tidak sesuai dengan standar keamanan dapat menyebabkan keruntuhan pada lubang bukaan sehingga dibutuhkan dimensi pilar yang aman untuk diterapkan di lokasi penambangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dimensi spesimen terhadap kekuatan batu gamping dan pengaruh dimensi pilar terhadap kekuatan pilar sehingga dapat ditentukan dimensi minimum pilar yang aman untuk diterapkan pada proses penambangan. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan analisis regresi linier, rasio tinggi dan lebar spesimen berpengaruh kuat terhadap nilai kuat tekan batu gamping. Semakin meningkat rasio tinggi dan lebar spesimen maka semakin menurun nilai kuat tekan batu gamping. Hasil perhitungan dan analisis rasio tinggi dan lebar pilar terhadap kekuatan pilar menunjukkan hubungan yang kuat secara negatif yaitu semakin meningkat rasio tinggi dan lebar pilar maka kekuatan pilar akan semakin menurun. Keamanan suatu pilar ditentukan melalui nilai faktor keamanan lubang bukaan yaitu 1,5 untuk fasilitas tidak tetap dan 2 untuk fasilitas tetap. Berdasarkan hasil perhitungan tegangan pilar dan kekuatan pilar menggunakan dimensi yang bervariasi, untuk bukaan maksimum 5 m dibutuhkan pilar dengan ukuran 14 m x 5,5 m x 5,5 m untuk rasio 1 dan 14 m x 9 m x 13,5 m untuk rasio 1,5 pada fasilitas tidak tetap, sedangkan untuk fasilitas tetap dimensi minimum yang memenuhi adalah 15 m x 11 m x 11 m dengan rasio $H_p/W_p=1$.

Kata kunci: Kuat tekan uniaksial, rasio ukuran spesimen, kekuatan pilar, dimensi pilar, metode *room and pillar*, batu gamping kristalin

ABSTRACT

The room and pillar method is an underground mining method that leaves some of the mined material for sustaining the mining holes. The stability of the holes in the room and pillar method is affected by the dimensions of the openings holes and the dimensions of the supporting pillars. Pillars that are not under safety standards can cause a collapse in the opening holes so a safe pillar dimension is needed to be applied at the mining site. This study aims to determine the effect of specimen dimensions on limestone strength and the effect of pillar dimensions on pillar strength so the minimum pillar dimensions that are safe to be applied in the mining process can be determined. Based on the results of laboratory tests and linear regression analysis, the ratio of height and width has a strong effect on the compressive strength of limestone. The increase of the height and width ratio of the specimen makes the compressive strength of limestone decrease. The results from calculation and analysis of the height and width ratio of pillars to the strength of the pillars show a strong negative relationship, the increase of the height and width pillars ratio, makes the strength of the pillars decrease. The safety factor of opening holes is 1.5 for non-fixed facilities and 2 for fixed facilities. Based on the calculation results of pillar stress and pillar strength using various dimensions, for a span of 5 m required pillar with dimensions are 14 m x 5.5 m x 5.5 m for $H_p/W_p=1$ and 14 m x 9 m x 13.5 m for $H_p/W_p=1.5$ at non-fixed facilities, while the pillar minimum dimensions for the fixed facility are 15 m x 11 m x 11 m for $H_p/W_p=1$.

Keywords: Uniaxial compressive strength, specimen size ratio, pillar strength, pillar dimension, room and pillar method, crystalline limestone

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul Pengaruh Rasio Ukuran Tinggi dan Lebar Spesimen Marmer terhadap Nilai Kuat Tekan Uniaksial dan Aplikasinya pada Analisis Kekuatan Pilar yang dilakukan di Laboratorium Geomekanika Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Selawat serta salam senantiasa penulis haturkan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad *Sallallahu 'Alaihi Wasallam*, nabi yang telah membimbing umat manusia menuju jalan yang penuh dengan ilmu pengetahuan dan membebaskan manusia dari Zaman Jahiliyyah.

Tugas akhir ini membahas mengenai pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar spesimen marmer terhadap nilai kuat tekan batuan dengan menggunakan alat uji kuat tekan uniaksial serta aplikasi dari nilai kuat tekan pada analisis kekuatan pilar. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih kepada Bapak Nurdin selaku Kepala Teknik Tambang PT Gunung Marmer Raya yang telah mendampingi dan mengizinkan penulis untuk melakukan pengambilan batu gamping di lokasi penambangan PT Gunung Marmer Raya. Terima kasih kepada staf dan karyawan PT Gunung Marmer Raya yang telah menerima penulis dan rombongan selama di Lokasi PT Gunung Marmer Raya.

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 senantiasa menerima penulis untuk bertukar pikiran dan memberikan saran yang terbaik dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini. Terima kasih kepada Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T., selaku

dosen penguji yang telah memberikan saran penulisan tugas akhir kepada penulis. Terima kasih kepada Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah membimbing penulis dari awal kegiatan perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih kepada Staf Administrasi Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah membantu dalam pengurusan administrasi selama pelaksanaan penelitian ini.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman yang telah membantu dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini. Terima kasih kepada Anggota LBE Geomekanika yang telah memberi saran yang membangun kepada penulis dalam kegiatan penelitian ini. Terima kasih kepada teman-teman Teknik Pertambangan Angkatan 2017 yang telah memberikan bantuan dan saran yang membangun kepada penulis selama melaksanakan penelitian. Ucapan terima kasih penulis ucapkan khusus kepada Bapak Mastan dan Ibu Nurlindah selaku orang tua penulis yang senantiasa mendoakan, memotivasi, serta mendukung penulis dalam kondisi apapun.

Tugas akhir ini dibuat sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan penelitian yang relevan di masa yang akan datang.

Makassar, 20 Januari 2022

WIHDAH

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Lokasi Pengambilan Spesimen.....	5
1.6 Tahapan Penelitian	5
BAB II SIFAT MEKANIS BATUAN DAN KEKUATAN PILAR TAMBANG.....	9
2.1 Metamorfisme Batu Gamping	9
2.2 Sifat Fisik Batuan	10
2.3 Sifat Mekanis Batuan.....	15
2.4 Analisis Dasar pada Pilar.....	31
2.5 Analisis Regresi Linier Sederhana.....	38
BAB III METODE PENELITIAN.....	40
3.1 Studi Literatur	40
3.2 Pengambilan Data Lapangan dan Pengambilan Spesimen.....	40

	Halaman
3.3 Pengambilan Data di Laboratorium	41
3.4 Analisis Data	59
BAB IV PENGARUH RASIO UKURAN TINGGI DAN LEBAR SPESIMEN MARMER TERHADAP NILAI KUAT TEKAN UNIAKSIAL DAN APLIKASINYA PADA ANALISIS KEKUATAN PILAR.....	62
4.1 Data Uji Laboratorium	62
4.2 Analisis Pengaruh Rasio H/W Spesimen Marmer terhadap Nilai Kuat Tekan Uniaksial	75
4.3 Perhitungan <i>Tributary Area</i>	76
4.4 Perhitungan Kekuatan Pilar	77
4.5 Analisis Pengaruh Rasio Tinggi dan Lebar Pilar (H_p/W_p) terhadap Kekuatan Pilar	79
4.6 Analisis Persamaan Kekuatan Pilar	84
4.7 Dimensi Minimum Pilar yang Dapat Digunakan pada Lokasi Pengambilan Spesimen.....	86
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	89
5.1 Kesimpulan	89
5.2 Saran	90
DAFTAR PUSTAKA	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
2.1	Ilustrasi kondisi batuan; (a) Kondisi batuan alami; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) Kondisi batuan kering.....	11
2.2	(a) Perubahan dimensi dan arah deformasi pada spesimen batuan uji kuat tekan uniaksial (Thuro, 2001); (b) Pola distribusi gaya uniaksial pada berbagai dimensi spesimen batuan (Kim <i>and</i> Yi, 2002)	17
2.3	Grafik perbedaan keruntuhan batuan yang bersifat brittle dan duktil (Hudson <i>and</i> Harrison, 1997).....	18
2.4	Tipe keruntuhan pada spesimen uji kuat tekan uniaksial: (a) <i>Axial splitting</i> ; (b) <i>Shearing along plane</i> ; (c) <i>Axial splitting with shearing</i> ; (d) <i>Multiple fracturing</i> ; (e) <i>Failure along foliation</i> (Singh <i>et al.</i> , 2019)	18
2.5	Kurva tegangan-regangan uji kuat tekan uniaksial (Rai dkk., 2014) ...	19
2.6	(a) Kurva modulus sekan; (b) Kurva modulus tangen; (c) Kurva modulus rata-rata (ISRM, 1979).....	21
2.7	Hubungan kuat tekan semu terhadap rasio ukuran L/D pada Dolomit Dunham (Mogi, 2007)	28
2.8	Nilai rasio kritis perubahan ukuran panjang dan diameter (L/D) spesimen (Mogi, 2007).....	29
2.9	Distribusi gaya dari pelat penekan pada spesimen; (a) Kondisi spesimen dan pelat penekan sebelum diberi gaya; (b) Prediksi regangan yang dapat terjadi pada spesimen apabila diberi gaya tekan; (c) Distribusi gaya akibat pelat penekan (Brady <i>and</i> Brown, 2004).....	30
2.10	(a) Penampang material yang akan ditambang dengan ketebalan yang seragam; (b) Komponen dimensi pada pilar; (c) Gaya yang bekerja pada pilar secara aksial (Brady <i>and</i> Brown, 2004)	32
2.11	Geometri <i>tributary area</i> pada pilar pada pembebanan secara uniaksial (Brady <i>and</i> Brown, 2004)	33
3.1	Pengambilan spesimen pada salah satu pilar di lokasi penambangan PT Gunung Marmer Raya.....	41
3.2	Peralatan preparasi spesimen: (a) <i>Rock saw machine</i> 15 inci; (b) <i>Bench grinder</i> ; (c) Alat ukur panjang	42
3.3	Proses pemotongan spesimen marmer: (a) Pengukuran dimensi spesimen batuan; (b) Pemotongan spesimen menggunakan <i>rock saw machine</i> ; (c) Bentuk spesimen setelah dipotong	43

Gambar	Halaman
3.4 Peralatan uji sifat fisik batuan: (a) Spesimen batuan; (b) Oven; (c) Neraca Ohaus; (d) Desikator; (e) Tali; (f) Pompa vakum; (g) Timbangan digital; (h) Wadah berisi air	44
3.5 Penimbangan berat awal spesimen uji sifat fisik.....	46
3.6 Perendaman spesimen uji sifat fisik di dalam desikator	47
3.7 Proses penimbangan spesimen dalam kondisi tergantung di dalam air	48
3.8 Pengeringan spesimen menggunakan oven	48
3.9 Spesimen uji kuat tekan uniaksial.....	50
3.10 Peralatan uji kuat tekan uniaksial batuan: (a) Jangka Sorong; (b) <i>Dial gauge</i> ; (c) <i>Hydraulic compressor machine</i> ; (d) Kacamata <i>safety</i> ; (e) Sepatu <i>safety</i>	51
3.11 Pengukuran dimensi spesimen uji kuat tekan uniaksial: (a) Pengukuran lebar spesimen; (b) Pengukuran tinggi spesimen	52
3.12 (a) Pemasangan <i>dial gauge</i> pada alat tekan; (b) Posisi <i>dial gauge</i> yang telah dipasang.....	53
3.13 (a) Posisi pembacaan gaya penekan pada pengujian kuat tekan uniaksial; (b) Skala pengukur gaya tekan; (c) Kondisi batuan yang telah diuji	54
3.14 Diagram alir penelitian	61
4.1 (a) Batu gamping kristalin dari lokasi penelitian; (b) Tekstur pada batu gamping	63
4.2 Hasil pengujian kuat tekan uniaksial	67
4.3 Grafik hubungan rasio H/W spesimen dengan nilai kuat tekan uniaksial	70
4.4 (a) Perbandingan kondisi spesimen marmer yang telah diuji kuat tekan; (b) Kondisi spesimen yang rapuh; (c) Kondisi spesimen yang kuat	71
4.5 Grafik hubungan rasio tinggi dan lebar (H/W) spesimen dengan modulus elastisitas.....	72
4.6 Grafik hubungan rasio tinggi dan lebar (H/W) spesimen dengan nisbah Poisson.....	74
4.7 Grafik pengaruh rasio tinggi dan lebar (H/W) spesimen marmer terhadap nilai kuat tekan uniaksial.....	75

Gambar	Halaman
4.8 Grafik pengaruh rasio tinggi dan lebar pilar (H_p/W_p) terhadap kekuatan pilar menggunakan nilai kuat tekan 61,29 MPa	80
4.9 Grafik pengaruh rasio tinggi dan lebar pilar (H_p/W_p) terhadap kekuatan pilar menggunakan nilai kuat tekan 39,20 MPa	80
4.10 Grafik pengaruh rasio panjang dan lebar pilar (H_p/W_p) terhadap kekuatan pilar menggunakan nilai kuat tekan 36,70 MPa	81
4.11 Grafik hubungan rasio H_p/W_p , nilai kuat tekan uniaksial, dan kekuatan pilar	84

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Kategori nisbah Poisson (Belyadi, 2019)	23
2.2 Skala Mohs.....	24
2.3 Nilai kekuatan semu spesimen dengan rasio perbandingan panjang dan diameter yang berbeda menggunakan uji kuat tekan uniaksial (Mogi, 2007)	27
2.4 Tingkat keeratan hubungan dua variabel berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sunyoto, 2012).....	39
3.1 Hasil pengujian sifat fisik	49
3.2 Hasil pengukuran tinggi dan lebar spesimen	55
3.3 Hasil pengukuran deformasi aksial	56
3.4 Hasil pengukuran deformasi lateral 1	57
3.5 Hasil pengukuran deformasi lateral 2	58
4.1 Hasil perhitungan bobot isi batuan.....	64
4.2 Hasil perhitungan berat jenis batuan.....	65
4.3 Hasil perhitungan kadar air batuan	65
4.4 Hasil perhitungan derajat kejenuhan, porositas, dan nisbah rongga batuan.....	66
4.5 Hasil pengolahan data uji kuat tekan uniaksial spesimen.....	69
4.6 Nilai kekuatan pilar berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan kekuatan pilar.....	78
4.7 Hasil analisis regresi linier pengaruh rasio H_p/W_p terhadap kekuatan pilar menggunakan nilai kuat tekan 61,29 MPa.....	82
4.8 Hasil analisis regresi linier pengaruh rasio H_p/W_p terhadap kekuatan pilar menggunakan nilai kuat tekan 39,20 MPa.....	82
4.9 Hasil analisis regresi linier pengaruh rasio H_p/W_p terhadap kekuatan pilar menggunakan nilai kuat tekan 36,70 MPa.....	83
4.10 Dimensi pilar yang memenuhi nilai faktor keamanan pilar	87

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A. Peta Lokasi Pengambilan Spesimen.....	95
B. Lembar Deskripsi Makroskopis Batuan.....	97
C. Perhitungan Sifat Fisik Batuan	99
D. Hasil Uji Kuat Tekan Uniaksial	106
E. Perhitungan Kekuatan Pilar	126
F. Perhitungan Dimensi Minimum Pilar yang Aman Digunakan di Lokasi Penelitian.....	140
G. Kartu Konsultasi Tugas Akhir.....	164

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Gunung Marmer Raya merupakan perusahaan yang beroperasi di bidang industri marmer dengan produksi rata-rata per bulan 2.500 m³ atau setara 7.000 ton marmer. Perusahaan ini memiliki lokasi penambangan marmer sendiri dan memiliki pabrik pengolahan marmer yang beroperasi di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan. Penambangan marmer dilakukan di lokasi penambangan seluas 18 hektar. Sebagian besar produksi marmer berasal dari lokasi penambangan bawah permukaan. Penambangan marmer bawah permukaan dilakukan dengan pemotongan blok marmer sehingga membentuk lubang bukaan persegi yang digunakan sebagai akses dalam pengambilan blok marmer.

Metode penambangan yang digunakan di PT Gunung Marmer Raya adalah *room and pillar*. Metode *room and pillar* biasanya diaplikasikan pada tambang yang memiliki potensi cebakan yang datar. *Room and pillar* merupakan metode penambangan bawah permukaan yang menyisakan sebagian material yang akan ditambang sebagai penyangga lubang bukaan. Penyangga atau pilar berfungsi untuk mendukung kestabilan bawah permukaan agar tidak terjadi keruntuhan. Pada tambang *room and pillar*, kestabilan tambang dipengaruhi oleh tegangan yang bekerja, beban vertikal lapisan penutup, kondisi massa batuan, kedalaman penambangan, dan kekuatan pilar (Purwanto dkk., 2020). Kestabilan pilar dapat dianalisis dengan membandingkan tekanan yang akan diterima pilar dengan kekuatan pilar. Kekuatan pada pilar dipengaruhi oleh dimensi pilar berupa ukuran panjang, lebar, dan tinggi pilar. Kondisi lokasi penelitian menunjukkan adanya pilar yang diberikan tambahan material untuk

membantu menyangga beban di atasnya karena munculnya rekahan pada pilar tersebut. Selain itu, belum ada batas dimensi minimum pilar yang harus ditinggalkan untuk menahan beban di atasnya apabila dibuat lubang bukaan. Oleh karena itu, perancangan geometri pilar sangat penting untuk menentukan dimensi pilar yang dapat menahan beban batuan sekitar lubang bukaan. Kekuatan pilar dapat diperoleh dari nilai kuat tekan uniaksial batuan. Analisis dan pengukuran nilai kuat tekan batuan dapat dilakukan melalui pengujian di laboratorium terhadap spesimen batuan yang diperoleh dari lapangan (Hakim dkk., 2016).

Kuat tekan batuan (σ_c) merupakan sifat mekanis batuan yang dapat digunakan dalam memprediksi kekuatan dari batuan (Franklin *and* Dessault, 1989). Nilai kekuatan batuan ditentukan berdasarkan kemampuan batuan untuk menahan tegangan yang bekerja pada batuan tanpa terjadinya keruntuhan pada batuan (Xiu *et al.*, 2020). Penentuan nilai kuat tekan batuan di laboratorium dapat dilakukan melalui beberapa jenis metode pengujian yaitu uji kuat tekan uniaksial (*uniaxial compressive strength test*), uji kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strength test*), tes Franklin (*point load test*), uji kuat tekan triaksial (*triaxial compression test*), dan uji kuat geser langsung (*direct shear strength test*). Di antara beberapa pengujian laboratorium tersebut, yang sering digunakan dalam menentukan kekuatan batuan adalah uji kuat tekan uniaksial (Goodman, 1989).

Nilai kuat tekan batuan dalam bidang pertambangan digunakan dalam desain tambang terbuka dan tambang bawah permukaan. Nilai kuat tekan uniaksial batuan merupakan salah satu parameter yang penting dalam melakukan analisis geoteknik, seperti peledakan batuan, pembuatan terowongan untuk kebutuhan transportasi, perancangan terowongan tambang bawah permukaan, pembuatan bendungan, serta penggalian batuan secara mekanis (Momeni *et al.*, 2015; Nazir *et al.*, 2013).

Pengujian laboratorium untuk penentuan dimensi pilar telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan melakukan pengujian terhadap spesimen yang terbuat dari campuran semen dan pasir. Penelitian lain dilakukan pada jenis batuan sedimen dengan mengubah luas permukaan dan ukuran spesimen. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin meningkat dimensi spesimen maka nilai kuat tekan akan semakin menurun (Komurlu, 2018; Hakim dkk., 2016; Talinusa dkk., 2014).

Dimensi spesimen yang diuji di laboratorium sangat berpengaruh terhadap kekuatan batuan (Walton, 2017). Beberapa pengujian untuk material buatan dan batuan sedimen telah dilakukan dan diperoleh hasil yang sama, yaitu semakin bertambah ukuran dimensi spesimen maka nilai kuat tekan semakin menurun. Berdasarkan penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini dilakukan pengujian pada jenis batuan berbeda yaitu batuan marmer dari Provinsi Sulawesi Selatan tepatnya di PT Gunung Marmer Raya untuk mengetahui kekuatan batuan dan mengetahui korelasi kekuatan batuan terhadap ukuran spesimen dan korelasi dimensi pilar terhadap kekuatan pilar. Pengaruh dimensi pilar terhadap kekuatan pilar marmer sangat besar karena menentukan kemampuan pilar menahan beban lubang bukaan dan hal ini berkaitan langsung dengan keselamatan pekerja dan kegiatan produksi tambang. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian terhadap spesimen marmer dengan dimensi yang berbeda untuk memperoleh referensi nilai kuat tekan dan memprediksi kekuatan pilar yang aman dalam kegiatan penambangan.

Penelitian mengenai kestabilan lubang bukaan di PT Gunung Marmer Raya telah dilakukan oleh Purwanto dkk. pada tahun 2020 yang menunjukkan bahwa lubang bukaan maksimum (*span*) yang dapat dibuat tanpa penyanggaan di lokasi penelitian adalah 5 m. Oleh karena itu, pada penelitian ini juga dilakukan analisis faktor keamanan pilar untuk menentukan dimensi minimum pilar yang aman diterapkan di lokasi penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian mengenai kekuatan batuan marmer untuk kebutuhan analisis kekuatan pilar dan penentuan batas dimensi minimum pilar yang harus disisakan pada kegiatan produksi marmer di lokasi penelitian belum dilakukan. Oleh karena itu, rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. bagaimana pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar spesimen terhadap nilai kuat tekan batuan marmer;
2. bagaimana pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar pilar terhadap kekuatan pilar; dan
3. berapa dimensi minimum pilar yang aman digunakan untuk kegiatan penambangan di lokasi penelitian.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dilakukannya penelitian ini sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar spesimen terhadap nilai kuat tekan batuan marmer.
2. Menganalisis pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar pilar terhadap kekuatan pilar.
3. Menentukan dimensi minimum pilar yang aman digunakan untuk kegiatan penambangan di lokasi penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini berupa nilai kuat tekan uniaksial batuan marmer yang dapat digunakan dalam menghitung kekuatan pilar. Hasil penelitian ini juga dapat

menjadi referensi dalam proses perancangan pilar penambangan terutama dalam penentuan dimensi minimum pilar yang aman untuk kegiatan penambangan marmer di lokasi penelitian.

1.5 Lokasi Pengambilan Spesimen

Pengambilan spesimen batuan dilakukan di lokasi penambangan bawah permukaan PT Gunung Marmer Raya, Desa Tabo-Tabo, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, Provinsi Sulawesi Selatan. Lokasi pengambilan spesimen merupakan lokasi penambangan marmer yang dilakukan dengan membuat bukaan pada dasar bukit. Lokasi pengambilan spesimen berjarak 73 km dari Kota Makassar dan dapat ditempuh melalui jalur darat selama 2 jam ke arah utara Kota Makassar. Secara astronomis, lokasi pengambilan spesimen terletak pada koordinat $119^{\circ}39'00''$ BT dan $4^{\circ}46'08''$ LS. Peta tunjuk lokasi penelitian dapat dilihat pada Lampiran A.

1.6 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahap, antara lain:

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan dilakukan untuk memperoleh informasi lebih detail mengenai topik penelitian yang akan dilakukan. Tahap persiapan meliputi kegiatan berikut.

a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari dan mengkaji referensi yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Referensi yang dibutuhkan untuk penelitian ini mengenai parameter-parameter yang memengaruhi nilai kuat tekan uniaksial terutama pengaruh ukuran terhadap nilai kuat tekan uniaksial. Referensi yang digunakan bersumber dari buku teks, buku digital, jurnal penelitian, dan artikel ilmiah, serta informasi terkait dari internet.

b. Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Perumusan masalah dilakukan setelah dilakukan kajian literatur dari berbagai sumber mengenai penambangan marmer dan setelah dilakukan kunjungan ke lokasi penambangan. Masalah yang diangkat pada penelitian ini adalah adanya pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar spesimen marmer terhadap nilai kuat tekan uniaksial, pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar pilar terhadap kekuatan pilar, dan penentuan dimensi minimum pilar yang aman digunakan di lokasi penelitian.

2. Tahap Pengambilan Data

Data-data yang digunakan pada penelitian ini berupa data dari hasil pengujian spesimen di Laboratorium Geomekanika Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin dan data lapangan yang diperoleh dari lokasi penambangan PT Gunung Marmer Raya. Tahap pengambilan data yang dilakukan meliputi pengambilan spesimen, preparasi spesimen, dan pengujian spesimen di laboratorium.

a. Pengambilan Spesimen Marmer

Spesimen yang digunakan sebagai spesimen uji pada penelitian ini adalah batuan dari lokasi penambangan PT Gunung Marmer Raya yang terletak di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, Provinsi Sulawesi Selatan. Spesimen yang diambil berupa bongkahan batuan dari salah satu pilar di PT Gunung Marmer Raya.

b. Preparasi Spesimen Uji

Preparasi spesimen uji bertujuan untuk menyiapkan spesimen sebelum dilakukan pengujian. Spesimen yang dibutuhkan pada penelitian ini ada dua, yaitu spesimen untuk uji sifat fisik dan uji kuat tekan uniaksial. Spesimen uji sifat fisik tidak terikat dengan ukuran tertentu sehingga spesimen yang

digunakan adalah sisa hasil pemotongan spesimen uji kuat tekan uniaksial. Preparasi spesimen uji kuat tekan uniaksial meliputi pemotongan dan pengikisan permukaan spesimen. Bentuk spesimen yang digunakan pada penelitian ini yaitu prisma segi empat. Pemotongan dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Setelah dilakukan pemotongan, permukaan spesimen dikikis untuk memperoleh permukaan yang datar dan rata. Permukaan yang datar dan rata diperlukan dalam pengujian kuat tekan uniaksial agar gaya yang bekerja pada permukaan spesimen saat ditekan terdistribusi dengan baik.

c. Pengujian Spesimen

Pengujian spesimen di laboratorium meliputi pengujian sifat fisik dan pengujian sifat mekanis.

1) Sifat Fisik

Data sifat fisik batuan diperoleh dari serangkaian kegiatan pengujian sifat fisik batuan. Pengujian sifat fisik batuan dilakukan di Laboratorium Geomekanika dan Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

2) Sifat Mekanis

Sifat mekanis diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan uniaksial pada spesimen yang dilakukan di Laboratorium Geomekanika Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

3. Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data terbagi menjadi dua, yaitu pengolahan data hasil pengujian sifat fisik dan hasil pengujian sifat mekanis. Pengolahan data hasil pengujian sifat fisik batuan dilakukan dengan menghitung nilai parameter berdasarkan persamaan yang telah ditentukan. Pengolahan data hasil pengujian sifat mekanis dilakukan

dengan menghitung tegangan dan regangan yang dialami spesimen untuk memperoleh nilai kuat tekan uniaksial, modulus elastisitas, dan nisbah Poisson. Data hasil uji kuat tekan kemudian dianalisis untuk menentukan pengaruh rasio ukuran tinggi dan lebar spesimen terhadap nilai kuat tekan uniaksial. Data hasil uji sifat fisik digunakan dalam analisis *tributary area* untuk menentukan tegangan pada pilar. Data nilai kuat tekan uniaksial digunakan pada analisis kekuatan pilar menggunakan beberapa persamaan untuk menentukan hubungan antara rasio tinggi dan lebar pilar terhadap kekuatan pilar. Nilai kekuatan pilar dan tegangan pilar kemudian dibandingkan untuk memperoleh nilai faktor keamanan pilar yang digunakan dalam penentuan dimensi minimum pilar yang aman digunakan di lokasi penelitian.

4. Tahap Penyusunan Laporan

Tahap penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari kegiatan penelitian. Data-data yang telah diperoleh dan dianalisis kemudian disajikan dalam laporan. Pada bagian akhir laporan ditarik kesimpulan dari masalah-masalah yang telah dirumuskan sebelumnya berdasarkan hasil dari pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan. Laporan disusun berdasarkan format yang telah ditentukan oleh Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

5. Seminar dan Penyerahan Laporan Tugas Akhir

Laporan tugas akhir yang telah disusun kemudian dipresentasikan di hadapan pembimbing dan tim penguji dalam Seminar Hasil Penelitian Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Selanjutnya hasil penelitian dipresentasikan dalam Ujian Sidang Sarjana Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Laporan akhir yang telah dipresentasikan dalam seminar hasil dan ujian sidang sarjana diserahkan ke Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

BAB II

SIFAT MEKANIS BATUAN DAN KEKUATAN PILAR TAMBANG

2.1 Metamorfisme Batu Gamping

Batu gamping merupakan batuan yang sensitif terhadap tekanan dan perubahan suhu. Batu gamping yang menerima efek tekanan akan mengalami distorsi struktur kristal sehingga terjadi penurunan stabilitas dari susunan kristal tersebut. Tekanan yang meningkat pada batuan akan menyebabkan terbentuknya inti kristal baru di lokasi terjadinya deformasi yang paling besar. Perubahan akibat tekanan berpengaruh terhadap ukuran butir, permukaan belahan, dan bidang pertemuan antarkristal. Kristal yang terbentuk akan mengikuti tekanan dominan yang bekerja pada batu gamping. Adanya tekanan dan perubahan suhu ini membantu terbentuknya ikatan senyawa baru dalam batu gamping (rekristalisasi). Batuan hasil rekristalisasi atau metamorfisme batu gamping disebut marmer.

Marmer adalah batuan metamorf yang komposisi mineralnya sebagian besar terdiri dari mineral kalsit (CaCO_3) dan biasanya mengandung mineral lain, seperti mineral lempung, mika, kuarsa, pirit, oksida besi, dan grafit. Dalam proses metamorfisme, kalsit batu gamping mengkristal kembali membentuk batuan yang merupakan massa kristal kalsit yang teratur dan mengalami perubahan tekstur. Sebagian besar marmer terbentuk di batas lempeng konvergen yang banyak terjadi metamorfisme regional. Beberapa marmer terbentuk dari proses metamorfisme kontak, yaitu ketika badan magma melewati dan membakar batu gamping atau doloston yang berdekatan. Pada proses metamorfisme awal, kalsit dalam batu gamping berukuran sangat kecil dan sulit untuk dikenali. Seiring berlanjutnya proses metamorfisme, kristal kalsit tumbuh menjadi lebih besar dan mudah dikenali karena susunannya yang teratur (Elkader *et al.*, 2016).

Komposisi kimiawi marmer sangat bervariasi tergantung pada lokasi dan mineral pengotor yang ada pada batu gamping selama rekristalisasi. Komposisi kimia utama marmer adalah: 38–42% kapur (CaO), 20–25% silika (SiO₂), 2–4% alumina (Al₂O₃), 1,5–2,5% oksida (NaO dan MgO), dan 30–32% karbonat (MgCO₃). Pada suhu yang rendah, marmer yang mengandung kuarsa akan membentuk kalsit, dolomit, talk (Mg₃[(OH)₂.Si₄O₁₀]), dan melepaskan karbon dioksida. Talk akan terganti membentuk tremolit (Ca₂Mg₅[(OH)₂.Si₈O₂₂]). Pada suhu yang tinggi, tremolit akan bereaksi dengan kalsit dari diopside CaMg(Si₃O₆) dan bereaksi dengan dolomit untuk membentuk forsterit (Mg₂SiO₄). Kalsit dan kuarsa dapat bereaksi membentuk wollastonit (CaSiO₃).

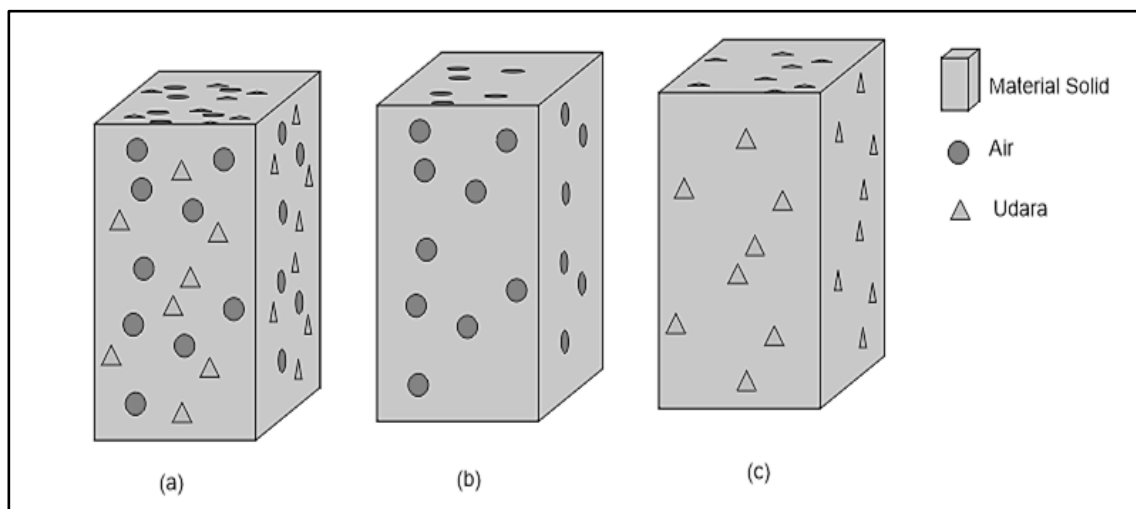
Mineral pengotor yang sering dijumpai pada marmer adalah rijang, garnet, hematit, *microcline*, talk, forsterit, muskovit, biotit, tremolit aktinolit, dan kuarsa. Mineral pengotor menjadi penentu corak dan warna pada marmer. Marmer kalsit yang murni berwarna putih sehingga apabila pengotor yang terkandung sedikit, marmer akan berwarna putih. Mineral pengotor berupa hematit memberi marmer warna kemerahan, limonit memberi marmer warna kuning, dan serpentin memberi warna hijau pada marmer (Elkader *et al.*, 2016).

2.2 Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan merupakan karakteristik dasar batuan yang memengaruhi perilaku batuan. Perbedaan komposisi padatan, air, dan udara dari setiap batuan menyebabkan terjadinya perbedaan karakteristik yang berkaitan dengan kekuatan batuan apabila dilakukan pengujian sifat mekanis. Sifat fisik batuan berfungsi sebagai data pendukung dari batuan yang akan diuji sifat mekanisnya. Penelitian mengenai prediksi kekuatan batuan dari pengujian sifat fisik batuan telah banyak dilakukan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, para peneliti memperkenalkan beberapa persamaan empiris yang dapat digunakan dalam menentukan kekuatan

batuan berdasarkan sifat fisik batuan (Rajabzadeh, 2012). Informasi mengenai kecenderungan dan sifat-sifat dari batuan alami dapat diperoleh dengan melakukan pengujian skala kecil di laboratorium. Pengujian spesimen skala kecil dianggap dapat mewakili kondisi massa batuan yang ada di lapangan secara keseluruhan (Arif, 2016).

International Society for Rock Mechanics (ISRM) 1977 mengatur standar pengujian sifat fisik batuan. Data sifat fisik batuan diperoleh dengan menimbang batuan alami yang belum diberikan perlakuan khusus untuk memperoleh nilai berat batuan alami (W_n). Selanjutnya batuan dijenuhkan selama 24 jam menggunakan desikator untuk memperoleh nilai berat jenuh (W_w). Batuan yang telah dijenuhkan kemudian ditimbang dalam keadaan menggantung di dalam air untuk memperoleh nilai berat jenuh di dalam air (W_s). Langkah selanjutnya adalah pengukuran massa batuan kering (W_o). Massa batuan kering merupakan massa batuan yang telah dikurangi kadar airnya dengan dipanaskan menggunakan oven pada suhu $\pm 105^\circ\text{C}$ selama 24 jam (Arif, 2016). Gambar 2.1 menunjukkan kondisi sifat fisik dari batuan.



Gambar 2.1 Ilustrasi kondisi batuan; (a) Kondisi batuan alami; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) Kondisi batuan kering

Parameter-parameter sifat fisik yang dapat diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium, meliputi bobot isi, berat jenis, kadar air, derajat kejenuhan, porositas, dan

nisbah rongga. Uraian mengenai parameter-parameter sifat fisik tersebut sebagai berikut (Arif, 2016).

1. Bobot Isi (*density*)

Bobot isi merupakan perbandingan antara massa batuan terhadap volume total batuan tersebut. Batuan terdiri dari massa padat, air, dan gas. Rongga pada batuan yang berupa pori-pori dan rekahan akan terisi oleh air dan gas. Rongga batuan pada kondisi natural akan terisi oleh air dan gas, sedangkan pada kondisi jenuh seluruh gas akan keluar dan rongga di antara padatan akan terisi penuh oleh air. Pada kondisi jenuh, batuan dianggap hanya memiliki massa padatan dan massa air. Bobot isi dibedakan menjadi tiga, yaitu bobot isi natural (*natural density*), bobot isi jenuh (*saturated density*), dan bobot isi kering (*dry density*).

a. Bobot isi natural (*natural density*)

Bobot isi natural merupakan nilai perbandingan antara massa batuan pada kondisi natural atau belum diberikan perlakuan khusus terhadap volume total batuan. Persamaan bobot isi natural dinyatakan pada Persamaan 2.1.

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

b. Bobot isi jenuh (*saturated density*)

Bobot isi jenuh merupakan nilai perbandingan antara massa batuan pada kondisi jenuh atau setelah perendaman terhadap volume total batuan. Persamaan bobot isi jenuh dinyatakan pada Persamaan 2.2.

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

c. Bobot isi kering (*dry density*)

Bobot isi kering merupakan nilai perbandingan antara massa batuan pada kondisi kering (setelah dioven) terhadap volume total batuan. Persamaan bobot isi kering dinyatakan pada Persamaan 2.3.

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

2. Berat Jenis (*specific gravity*)

Berat jenis merupakan perbandingan antara bobot isi padatan batuan terhadap bobot isi air. Berat jenis menyatakan perbedaan berat batuan dibandingkan dengan berat air. Berat jenis dibedakan menjadi berat jenis asli (*true specific gravity*) dan berat jenis semu (*apparent specific gravity*).

a. Berat jenis asli (*true specific gravity*)

Berat jenis asli merupakan nilai perbandingan antara bobot isi padatan dalam batuan terhadap bobot isi air yang terdapat pada batuan setelah dioven. Persamaan berat jenis asli dinyatakan pada Persamaan 2.4.

$$\text{Berat jenis asli} = \left(\frac{W_o}{W_o - W_s} \right) / \text{bobot isi air} \dots\dots\dots (2.4)$$

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

Berat jenis semu merupakan perbandingan antara bobot isi padatan dalam batuan terhadap bobot isi air. Perbandingan berat jenis semu dinyatakan pada Persamaan 2.5.

$$\text{Berat jenis semu} = \left(\frac{W_o}{W_w - W_s} \right) / \text{bobot isi air} \dots\dots\dots (2.5)$$

3. Kadar Air (*water content*)

Kadar air merupakan persentase perbandingan antara massa air dalam batuan dengan massa total batuan. Kadar air dibedakan menjadi kadar air asli (*natural water content*) dan kadar air jenuh (*saturated water content*).

a. Kadar air asli (*natural water content*)

Kadar air asli merupakan persentase perbandingan antara massa air dalam batuan dalam kondisi natural terhadap massa padatan dalam batuan. Persamaan kadar air asli dinyatakan pada Persamaan 2.6.

$$\text{Kadar air asli} = \left(\frac{W_n - W_o}{W_o} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

b. Kadar air jenuh (*saturated water content/absorption*)

Kadar air jenuh merupakan persentase perbandingan antara massa air pada kondisi jenuh terhadap massa padatan dalam batuan. Persamaan kadar air jenuh dinyatakan pada Persamaan 2.7.

$$\text{Kadar air jenuh} = \left(\frac{W_w - W_o}{W_o} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

4. Derajat Kejenuhan (*degree of saturation*)

Derajat kejenuhan merupakan persentase perbandingan antara kadar air natural dengan kadar air jenuh. Derajat kejenuhan menunjukkan perbandingan jumlah air yang terdapat dalam keadaan natural dengan volume maksimum air yang dapat mengisi rongga batuan. Persamaan derajat kejenuhan dinyatakan pada Persamaan 2.8.

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

5. Porositas (*porosity*)

Porositas merupakan persentase perbandingan antara volume pori terhadap volume total batuan. Persamaan porositas dinyatakan pada Persamaan 2.9.

$$\text{Porositas (n)} = \left(\frac{W_w - W_s}{W_w - W_s} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

6. Nisbah rongga (*void ratio*)

Nisbah rongga merupakan perbandingan antara volume rongga dalam batuan terhadap volume padatan pada batuan. Perbandingan nisbah rongga dinyatakan pada Persamaan 2.10.

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

Keterangan:

$W_o - W_s$ = Volume batuan tanpa pori

$W_w - W_s$ = Volume total batuan

W_n = berat spesimen natural (gram)

W_w	= berat spesimen jenuh (gram)
W_s	= berat spesimen gantung (gram)
W_o	= berat spesimen kering (gram)
n	= porositas

2.3 Sifat Mekanis Batuan

Sifat mekanis merupakan kecenderungan yang diperlihatkan oleh batuan apabila diberikan gaya, baik itu gaya tekan, tarik, atau geser. Pada umumnya batuan terbentuk dari agregat kristal dan partikel amorf yang bergabung dengan jumlah yang bervariasi. Kristal dalam batuan mewakili sifat mekanis dari batuan tersebut. Susunan kristal dalam batuan menentukan titik lemah dari struktur batuan serta menunjukkan jenis deformasi yang dapat terjadi pada batuan tersebut.

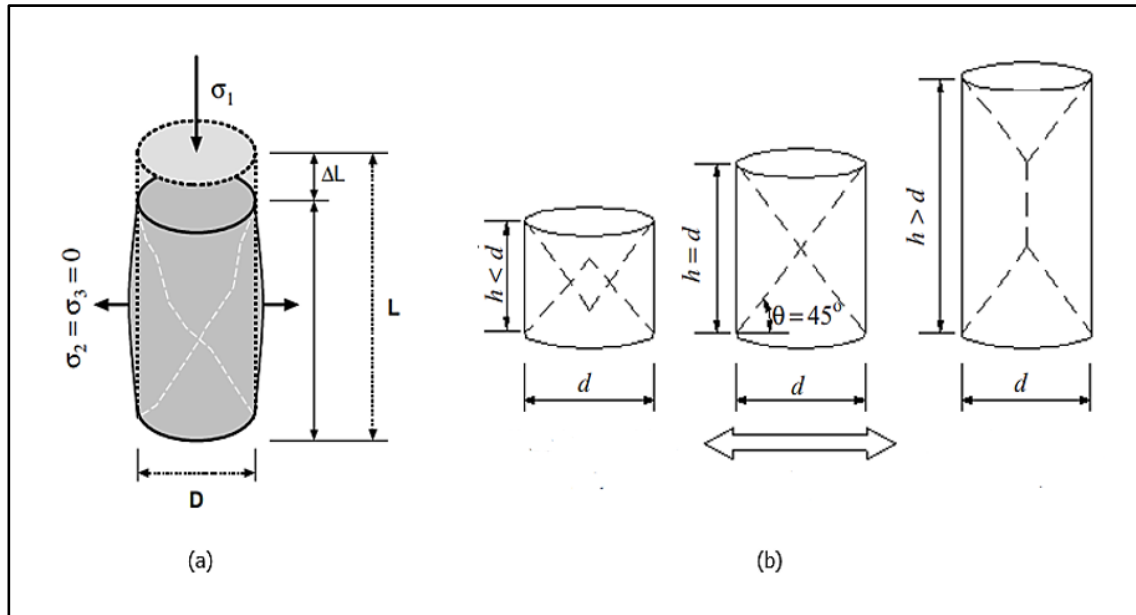
Nilai sifat mekanis batuan dapat diperoleh dari pengukuran spesimen batuan di laboratorium. Spesimen batuan yang diambil di lapangan memiliki dimensi yang lebih kecil dan dianggap memiliki partikel struktur yang homogen sesuai dengan kondisi yang ada di lapangan. Meski kondisi batuan di lapangan memiliki struktur yang teratur dan tersebar secara acak, namun spesimen uji untuk laboratorium dianggap mampu mewakili kondisi kemenerusan dan karakteristik struktur batuan di lapangan (Jaeger *et al.*, 2007). Pengujian sifat mekanis di laboratorium bersifat destruktif sehingga spesimen uji sifat mekanis tidak dapat digunakan kembali. Sifat mekanis batuan diperoleh melalui beberapa pengujian laboratorium, seperti uji kuat tekan uniaksial (*uniaxial compressive strength test*), uji kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strength test*), tes Franklin (*point load test*), uji kuat tekan triaksial (*triaxial compression test*), *punch shear test*, uji kuat geser (*direct shear strength test*), dan uji cepat rambat gelombang ultrasonik (*ultrasonic velocity test*) (Arif, 2016). Beberapa uji laboratorium ini bertujuan untuk

menentukan kekuatan dari batuan. Uji laboratorium yang sering digunakan dalam penentuan kekuatan batuan adalah uji kuat tekan uniaksial.

2.3.1 Kuat Tekan Uniaksial (*Uniaxial Compressive Strength/UCS*)

Kekuatan batuan dapat diperoleh dari pengujian uniaksial yang bergantung pada kadar air spesimen, sifat anisotropi, dan prosedur tes yang digunakan (BSI, 2010). Kuat tekan uniaksial digunakan untuk menentukan kuat tekan batuan (σ_c), modulus elastisitas (E), dan nisbah Poisson (ν). Pengujian ini dilakukan dengan menekan spesimen di antara dua pelat yang akan menginduksi tegangan ke spesimen. Tegangan aksial merupakan variabel bebas terkontrol, sedangkan regangan aksial adalah variabel dependen. Perubahan pada spesimen dapat diukur menggunakan *dial gauge* yang diletakkan secara aksial untuk mengukur perubahan jarak antarpelat penekan dan secara lateral untuk mengukur perubahan spesimen secara horizontal. Regangan aksial dapat diperoleh dengan membandingkan perubahan panjang spesimen dengan panjang awal spesimen ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$). Jika gaya yang diberikan uniaksial, maka modulus elastisitas dapat diperoleh dari perbandingan antara tegangan dan regangan ($E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$). Gaya tekan pelat akan meningkat secara perlahan hingga terjadi keruntuhan pada spesimen. Tekanan terakhir yang membuat spesimen pecah merupakan nilai kuat tekan batuan (Jaeger *et al.*, 2007).

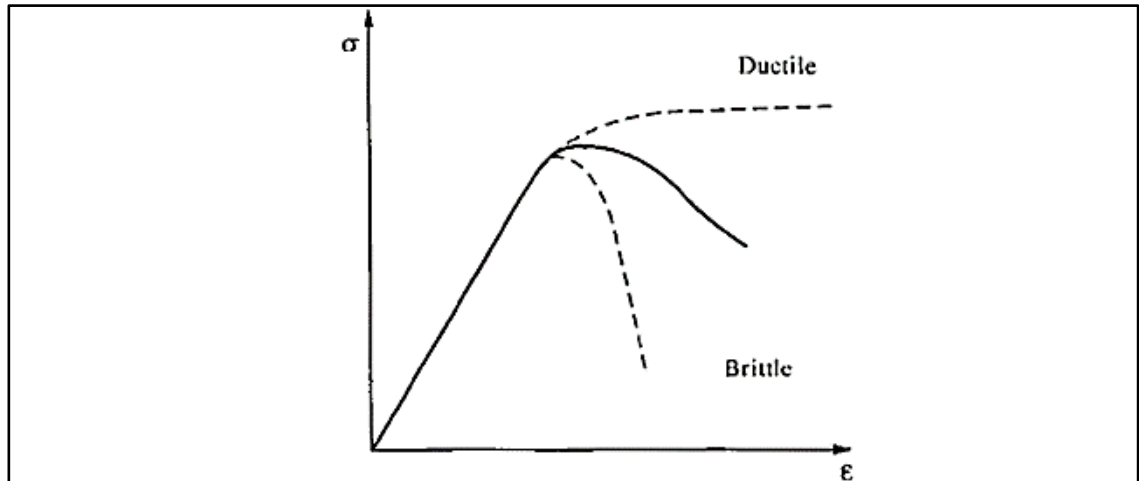
Menurut ISRM 1979 syarat spesimen batuan uji kuat tekan berbentuk silinder dengan perbandingan L/D antara 2,5–3 dan untuk diameter tidak kurang dari 54 mm sedangkan menurut ASTM 1991 perbandingan L/D spesimen antara 2–2,5 dengan diameter 47 mm. Spesimen batuan yang memiliki L/D > 2,5 akan menunjukkan nilai UCS yang lebih kecil dibandingkan dengan spesimen yang memiliki perbandingan L/D < 2,5. Spesimen dengan kondisi perbandingan L/D = 1 akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar karena tegangan yang bekerja pada spesimen akan saling bertemu. Distribusi tegangan pada batuan saat diberikan tekanan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 (a) Perubahan dimensi dan arah deformasi pada spesimen batuan uji kuat tekan uniaksial (Thuro, 2001); (b) Pola distribusi gaya uniaksial pada berbagai dimensi spesimen batuan (Kim *and* Yi, 2002)

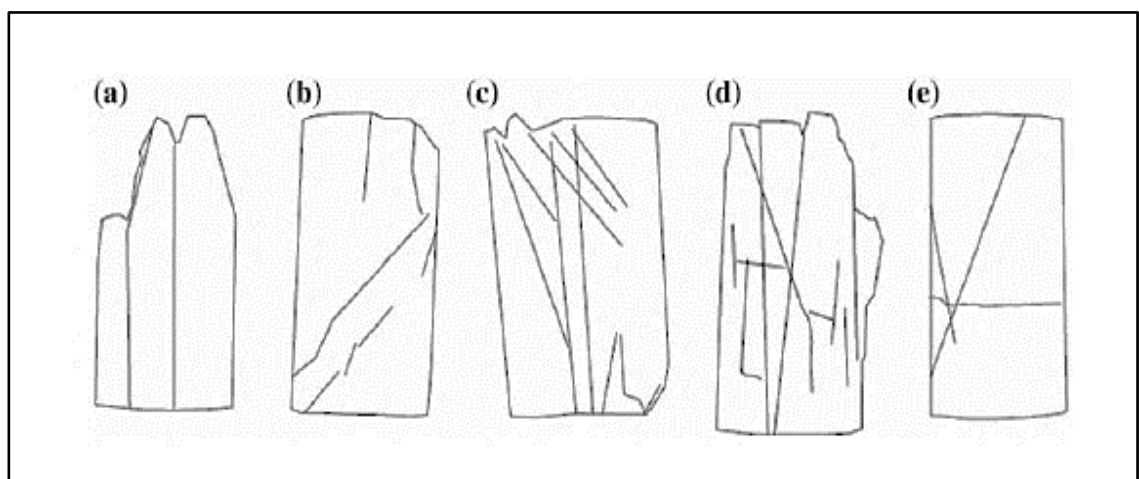
Pada Gambar 2.2 ditunjukkan bahwa kekuatan spesimen yang pendek lebih tinggi karena efek tekanan. Peningkatan rasio perbandingan panjang dan diameter (L/D) menyebabkan efek tekanan menurun secara bertahap dan menghilang pada nilai rasio kritis. Nilai kritis diperoleh dengan pengukuran berbagai rasio perbandingan ukuran panjang dan diameter (L/D) pada beberapa jenis batuan.

Uji kuat tekan uniaksial pada spesimen batuan dilakukan dengan pemberian beban pada arah aksial hingga batuan mengalami retak dan pecah. Jenis keruntuhan yang pada batuan terbagi menjadi dua, yaitu brittle yang menunjukkan ciri batuan yang akan mengalami keruntuhan secara tiba-tiba dan ductile yang menunjukkan ciri akan mengalami deformasi yang besar sebelum terjadi keruntuhan. Batuan memiliki sifat ductile pada saat mengalami tekanan pemampatan tinggi maupun temperatur yang tinggi. Bentuk grafik keruntuhan pada batuan ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Grafik perbedaan keruntuhan batuan yang bersifat brittle dan ductil (Hudson and Harrison, 1997)

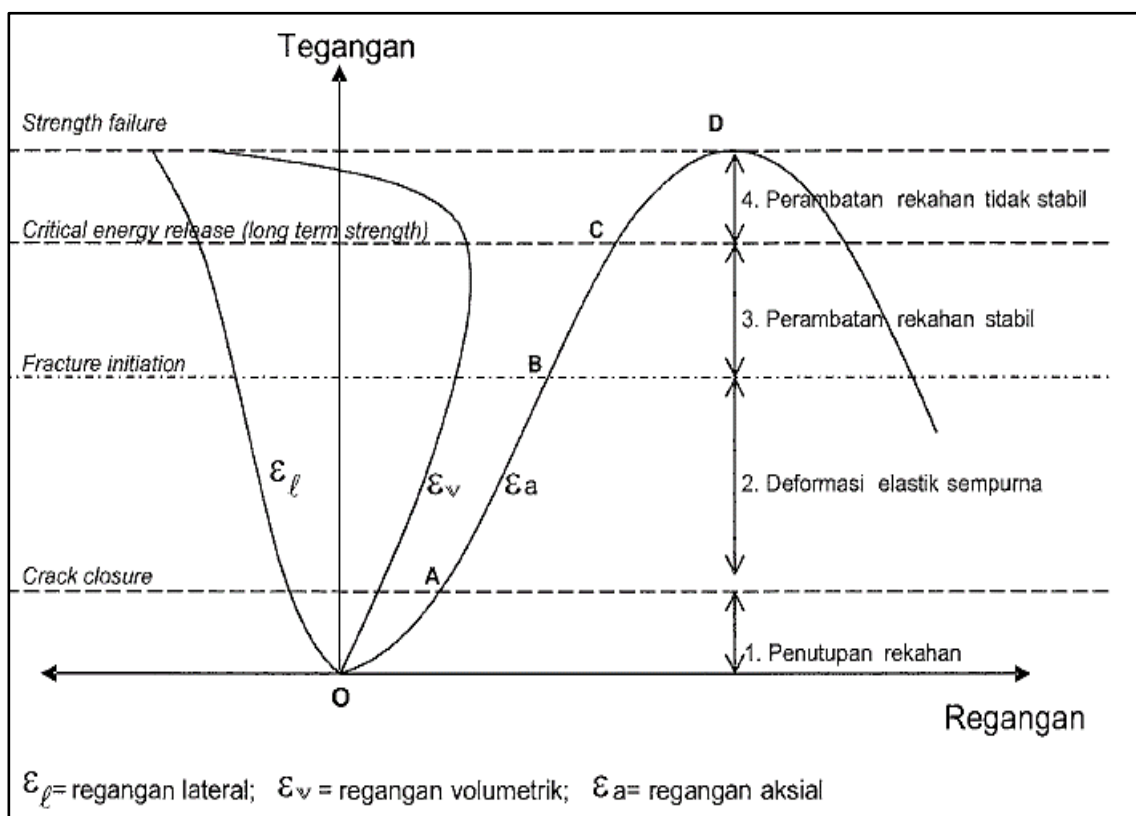
Pada uji kuat tekan uniaksial terdapat beberapa tipe keruntuhan. Tipe keruntuhan yang terjadi pada spesimen batuan ketika dilakukan pengujian kuat tekan uniaksial dipengaruhi oleh rekahan mikro di dalam batuan yang menginisiasi terjadinya keruntuhan pada batuan. Tipe keruntuhan yang dapat terjadi adalah *axial splitting*, *shearing along plane*, *axial splitting with shearing*, *multiple fracturing*, dan *failure along foliation* (Singh *et al.*, 2019). Tipe keruntuhan pada spesimen uji kuat tekan uniaksial dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Tipe keruntuhan pada spesimen uji kuat tekan uniaksial: (a) *Axial splitting*; (b) *Shearing along plane*; (c) *Axial splitting with shearing*; (d) *Multiple fracturing*; (e) *Failure along foliation* (Singh *et al.*, 2019)

Secara umum ada tiga tipe keruntuhan yang sering terjadi pada uji kuat tekan uniaksial, yaitu *shear failure*, *axial splitting*, dan *multiple fracturing*. *Shear failure* terjadi ketika rekahan tunggal atau beberapa rekahan menginisiasi ke seluruh spesimen batuan sehingga terjadi pergeseran sepanjang rekahan yang terbentuk. Bidang geser akan membentuk sudut tertentu terhadap tegangan aksial yang diberikan. *Axial splitting* terjadi apabila rekahan yang terjadi searah dengan tegangan aksial. Hal ini menunjukkan bahwa ikatan antarbutir pada spesimen akan runtuh akibat adanya gaya tarik yang bekerja. *Multiple fracturing* terjadi ketika keruntuhan yang terjadi pada spesimen banyak dan tidak beraturan. Tipe keruntuhan ini merupakan kombinasi tipe *shear failure* dan *axial splitting* (Singh *et al.*, 2019).

Hasil pengujian kuat tekan batuan dapat digambarkan melalui kurva tegangan-regangan (*stress-strain curve*) untuk setiap spesimen batuan yang diuji. Kurva tegangan regangan hasil uji kuat tekan uniaksial dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva tegangan-regangan uji kuat tekan uniaksial (Rai dkk., 2014)

Nilai kuat tekan uniaksial (σ_c) merupakan gambaran dari nilai tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh batuan sesaat sebelum batuan mengalami keruntuhan (*failure*) (Rai dkk., 2014). Persamaan kuat tekan uniaksial pada batuan dapat dilihat pada Persamaan 2.11.

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

Keterangan:

- σ_c = kuat tekan uniaksial (MPa)
- F = gaya yang bekerja saat spesimen hancur (kN)
- A = luas penampang awal spesimen (mm²)

Nilai kuat tekan uniaksial dipengaruhi oleh perbandingan antara diameter dan tinggi (L/D) spesimen batuan. Pengaruh dari diameter dan tinggi spesimen batuan dapat dilihat pada Persamaan 2.12 dan Persamaan 2.13.

Menurut ASTM: σ_c (untuk L=D) = $\frac{\sigma_c}{0,778 + \frac{0,22 D}{L}} \dots\dots\dots (2.12)$

Menurut Protodyakonov: σ_c (untuk L=2D) = $\frac{8 \sigma_c}{7 + \frac{2}{L/D}} \dots\dots\dots (2.13)$

Keterangan:

- σ_c = kuat tekan uniaksial (MPa)
- D = diameter spesimen (mm)
- L = panjang spesimen (mm)

2.3.2 Modulus Elastisitas (Modulus Young)

Modulus Young atau modulus elastisitas adalah kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastisnya. Pada uji kuat tekan uniaksial, spesimen batuan yang diberi tekanan akan mengalami beberapa tahap deformasi, yakni deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis merupakan perubahan bentuk pada benda saat gaya bekerja dan akan berhenti ketika gaya ditiadakan sedangkan deformasi plastis merupakan perubahan bentuk benda yang bersifat permanen dan bentuk benda akan

tetap meski gaya diadakan. Nilai modulus elastisitas diturunkan dari kemiringan kurva tegangan-regangan pada bagian yang linear karena pada saat itu spesimen batuan mengalami deformasi elastik. Nilai modulus elastisitas batuan dapat diperoleh menggunakan Persamaan 2.14 (Rai dkk., 2014).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a} \dots\dots\dots (2.14)$$

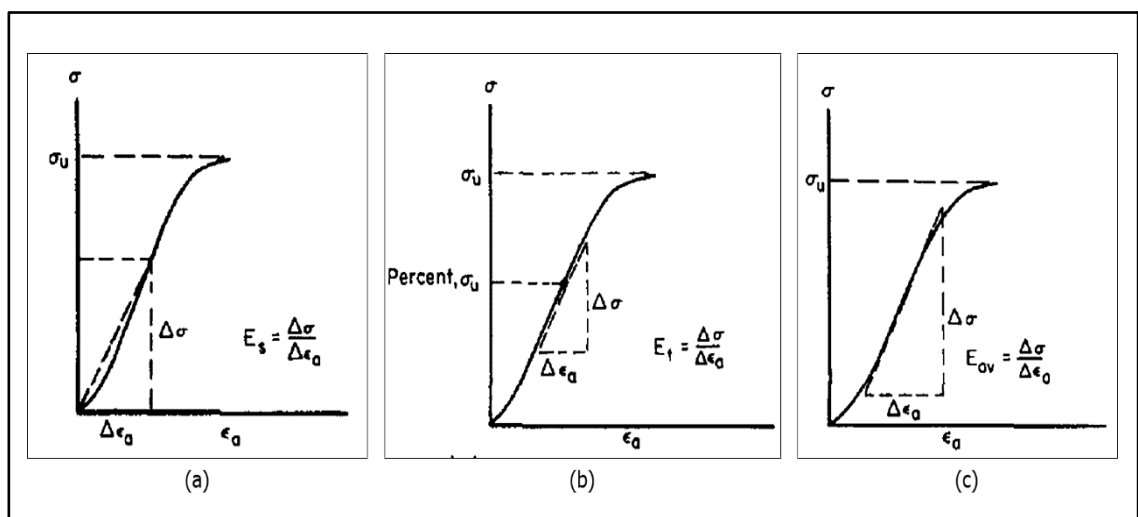
Keterangan:

E = modulus elastisitas (MPa)

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

$\Delta\epsilon_a$ = beda regangan aksial (%)

Modulus elastisitas terbagi menjadi 3 jenis, yaitu modulus sekan (*secant Young's modulus*), modulus tangen (*tangent Young's modulus*), dan modulus rata-rata (*average Young's modulus*). Kurva penentuan ketiga modulus elastisitas ini dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Rai dkk., 2014).



Gambar 2.6 (a) Kurva modulus sekan; (b) Kurva modulus tangen; (c) Kurva modulus rata-rata (ISRM, 1979)

1. Modulus sekan (*secant Young's modulus/E_s*), merupakan modulus elastisitas yang diukur dari tegangan = 0 sampai nilai tegangan mencapai 50%.

2. Modulus tangen (*tangent Young's modulus/E_t*), merupakan modulus elastisitas yang diukur pada tingkat tegangan yang tetap. Biasanya penentuan nilai modulus tangen diambil pada titik awal bagian linier kurva hingga tegangan 50%.
3. Modulus rata-rata (*average Young's modulus/E_{av}*), merupakan modulus elastisitas yang diukur dari rata-rata kemiringan kurva atau bagian linier yang terbesar dari kurva.

2.3.3 Nisbah Poisson (*Poisson Ratio/v*)

Nisbah Poisson (ν) adalah nilai mutlak dari perbandingan antara regangan lateral terhadap regangan aksial. Jika suatu material diregangkan pada satu arah, maka material tersebut cenderung mengkerut dan jarang mengembang pada dua arah lainnya. Sebaliknya, jika suatu material ditekan, maka material tersebut akan mengembang dan jarang mengkerut pada dua arah lainnya (Arif, 2016).

Pada deformasi elastik mekanis, kecenderungan material untuk mengkerut atau mengembang dalam arah tegak lurus terhadap arah pembebanan dikenal sebagai efek Poisson. Oleh karena itu, jika sebuah spesimen batuan silinder diberikan tegangan pada arah aksialnya, maka spesimen akan mengalami regangan baik ke arah aksial maupun ke arah lateral. Persamaan nisbah Poisson dapat dilihat pada Persamaan 2.15.

$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{aksial}}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan:

- ν = nisbah Poisson
- $\epsilon_{\text{lateral}}$ = regangan lateral (mm)
- ϵ_{aksial} = regangan aksial (mm)

Nisbah Poisson sangat bergantung pada tingkat tegangan dan dipengaruhi oleh pembukaan dan penutupan rekahan dalam batuan saat pengujian dilakukan. Nisbah Poisson nilainya bervariasi sesuai dengan deformasi yang dialami batuan tersebut. Nilai nisbah Poisson tidak memiliki satuan dan nilainya berkisar antara 0,1–0,45. Nisbah

Poisson rendah memiliki nilai antara 0,1–0,25 menunjukkan bahwa batuan mudah patah, sedangkan nisbah Poisson tinggi memiliki nilai antara 0,35–0,45 menunjukkan batuan sulit patah. Untuk batuan isotropik nilai nisbah Poisson berada di antara 0–0,5. Secara umum nilai nisbah Poisson pada batuan berkisar 0,05–0,45, dan untuk aplikasi rekayasa teknik nilai nisbah Poisson sekitar 0,2–0,3 dan untuk batubara berkisar 0,25–0,346 (Belyadi *et al.*, 2019). Kategori nisbah Poisson menurut Belyadi *et al.* (2019) menyatakan bahwa nisbah Poisson memiliki rentang nilai antara 0–0,5. Kategori nisbah Poisson ini dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kategori nisbah Poisson (Belyadi, 2019)

Kategori	Nilai Nisbah Poisson (ν)
Sangat rendah	$0 < \nu < 0,1$
Rendah	$0,1 < \nu < 0,2$
Medium	$0,2 < \nu < 0,3$
Tinggi	$0,3 < \nu < 0,4$
Sangat tinggi	$0,4 < \nu < 0,5$

2.3.4 Faktor yang Memengaruhi Hasil Uji Kuat Tekan Uniaksial

Nilai kuat tekan (σ_c), modulus elastisitas (E), dan nisbah Poisson (ν) pada pengujian kuat tekan uniaksial dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor internal dan faktor eksternal. Penjabaran dari faktor-faktor tersebut sebagai berikut.

1. Faktor Internal

Faktor internal merupakan faktor yang berasal dari jenis batuan atau jenis spesimen yang diuji. Berikut merupakan beberapa faktor internal yang berpengaruh pada nilai kuat uniaksial batuan.

a. Mineral pembentuk batuan

Kekerasan batuan ditentukan oleh mineral yang terkandung dalam batuan.

Semakin keras mineral pembentuk batuan maka semakin keras batuan

tersebut dan nilai kuat tekan batuan akan semakin besar. Skala kekerasan pada mineral pembentuk batuan dikenal dengan Skala Mohs yang dimulai dengan mineral lunak pada angka 1 dan berakhir dengan mineral yang paling keras pada angka 10. Urutan pada Skala Mohs dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Skala Mohs

Nama Mineral	Skala Mohs
Talk	1
Gypsum	2
Kalsit	3
Fluorit	4
Apatit	5
Feldspar	6
Kuarsa	7
Topaz	8
Korundum	9
Intan	10

Penelitian mengenai pengaruh komposisi mineral terhadap nilai kuat tekan uniaksial batuan telah dilakukan oleh Wang *et al.* (2019). Berdasarkan hasil penelitian terhadap rasio komposisi mineral kuarsa (kekerasan 7 Skala Mohs) dan feldspar (kekerasan 6 Skala Mohs) pada batuan ditunjukkan bahwa nilai kuat tekan pada batuan akan meningkat seiring meningkatnya komposisi mineral kuarsa pada batuan. Sebaliknya, semakin meningkat komposisi mineral feldspar pada batuan mengakibatkan menurunnya nilai kuat tekan batuan.

b. Porositas

Porositas merupakan perbandingan antara volume rongga batuan dan volume total batuan. Nilai porositas memengaruhi nilai kuat tekan uniaksial

batuan. Semakin besar nilai porositas batuan, maka nilai kuat tekan uniaksial batuan akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena batuan yang memiliki nilai porositas yang tinggi memiliki rongga yang besar sehingga memengaruhi kekuatan batuan. Penelitian yang dilakukan oleh Kessler *et al.* (2017) pada batuan basal menunjukkan bahwa porositas berpengaruh terhadap nilai kuat tekan batuan. Semakin besar nilai porositas dari batuan maka semakin kecil nilai kuat tekan uniaksial batuan tersebut.

c. Kandungan Air

Kandungan air pada batuan memengaruhi nilai kuat tekan uniaksial pada batuan. Semakin jenuh batuan, maka semakin rendah nilai kuat tekan uniaksial batuan tersebut. Hal ini terjadi karena ikatan partikel batuan akan melemah seiring bertambahnya kandungan air pada batuan tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh Sha *et al.* (2020) terhadap batuan basal di Stasiun Baihetan Cina menunjukkan bahwa kadar air memengaruhi nilai kuat tekan dan deformasi pada batuan. Semakin tinggi nilai kadar air suatu batuan maka semakin menurun nilai kuat tekan uniaksial batuan tersebut.

d. Bobot Isi

Bobot isi menunjukkan kerapatan dari suatu batuan. Secara prinsip semakin besar nilai bobot isi suatu batuan maka semakin padat batuan tersebut sehingga nilai kuat tekan dari batuan juga akan meningkat. Hasil penelitian yang dilakukan pada material *cement-stabilised rammed earth* (CSRE) yang banyak digunakan untuk bangunan di Australia menunjukkan bahwa nilai bobot isi kering dari material memengaruhi nilai kuat tekan material. Semakin tinggi nilai bobot isi kering pada material maka nilai kuat tekan material akan meningkat (Becket *and* Ciancio, 2015).

e. Bidang Lemah

Kehadiran bidang lemah sangat memengaruhi kekuatan batuan. Semakin banyak bidang lemah pada suatu batuan akan mengakibatkan bidang inisiasi deformasi batuan semakin banyak sehingga memengaruhi nilai kuat tekan dari batuan. Bidang lemah yang dimaksud berupa kekar pada batuan yang membentuk bidang rekahan sehingga batuan mudah terdeformasi.

f. Anisotropi

Sifat batuan yang anisotrop mengakibatkan hasil uji kuat tekan batuan akan berbeda antara batuan yang satu dengan batuan yang lainnya meski memiliki jenis yang sama. Anisotropi biasanya berkaitan dengan mikro-struktural, sub-*fabric*, orientasi kristal, bentuk, dan orientasi dari pori atau rekahan. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Yilmaz *and* Yucel (2014) terhadap travertin berlapis dari Sivas, Turki menunjukkan bahwa nilai kuat tekan paling tinggi diperoleh pada spesimen dengan kemiringan bidang anisotropi 0° dan 90° , sedangkan nilai kuat tekan terendah diperoleh pada kemiringan bidang anisotropi antara 30° – 45° .

2. Faktor Eksternal

Faktor eksternal berasal dari luar spesimen batuan. Faktor ini berkaitan dengan proses pengujian dan perlakuan terhadap spesimen batuan. Faktor eksternal yang memengaruhi nilai kuat tekan uniaksial dijabarkan sebagai berikut.

a. Geometri Spesimen

Geometri dan bentuk spesimen, seperti bentuk silinder, prisma, kubus, serta perbandingan antara tinggi dan diameter (L/D), maupun ukuran dari spesimen batuan sangat berpengaruh terhadap nilai kuat tekan uniaksial batuan. Dimensi spesimen yang distandardisasi oleh ISRM *Committee on Laboratory Test* (1979) yaitu rasio tinggi dan diameter spesimen memiliki

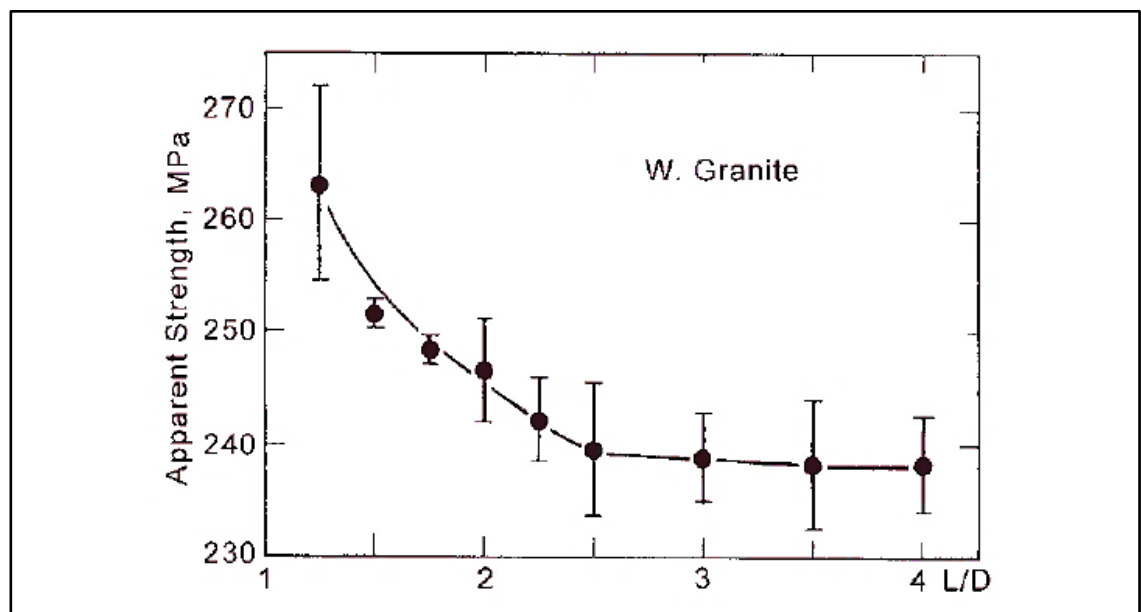
ukuran antara $2,5 < (L/D) < 3$. Nilai rasio tersebut ditetapkan karena pada ukuran tersebut, spesimen dianggap stabil secara elastis dan distribusi gaya yang diberikan pada spesimen tersebut lebih seragam apabila dibandingkan dengan spesimen yang memiliki perbandingan (L/D) yang lebih besar atau lebih kecil dari 2,5–3. Hubungan antara nilai kuat tekan uniaksial dan ukuran diameter ditunjukkan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Mogi (2007) seorang profesor di Universitas Tokyo yang melakukan percobaan pada tiga jenis batuan yaitu Dolomit Dunham, Granit Westerly, dan Trakit Mizuho. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai kekuatan semu spesimen dengan rasio perbandingan panjang dan diameter yang berbeda menggunakan uji kuat tekan uniaksial (Mogi, 2007)

Batuan	L/D	Jumlah Spesimen	Kekuatan Semu (MPa)	Kekuatan Relatif (%)
Dolomit Dunham	1,25	2	232±1	111,5
	1,50	3	225±3	107,5
	1,75	2	224±3	107
	2,00	3	219±3	104,5
	2,25	2	214±0	102,5
	2,50	2	209±0	100
	3,00	2	208±0	99,5
	4,00	1	207	99
Granit Westerly	1,25	2	263±9	109,5
	1,50	2	252±2	105
	1,75	2	248±2	103,5
	2,00	3	247±5	102,5
	2,25	3	242±4	100,5
	2,50	4	240±6	100
	3,00	2	239±4	99,5
	3,50	2	238±6	99
	4,00	1	238±5	99

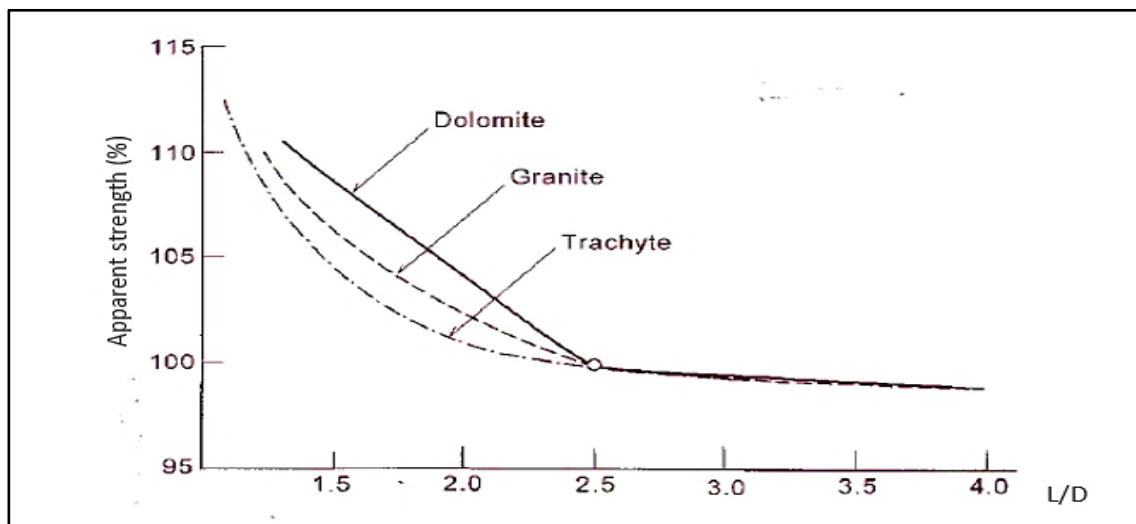
Batuan	L/D	Jumlah Spesimen	Kekuatan Semu (MPa)	Kekuatan Relatif (%)
Trakit Mizuho	1,00	1	126	115,5
	1,50	1	114	104,05
	1,75	1	112	103
	2,00	1	110	101
	2,25	1	112	102,5
	2,50	1	110	100
	3,00	1	109	99,5

Dolomit Dunham dan Granit Westerly merupakan batuan yang kompak dan seragam, sedangkan Trakit Mizuho merupakan batuan yang berpori dengan porositas 8,5% dan distribusi pori tidak seragam. Pada Tabel 2.3 ditunjukkan bahwa kekuatan Dolomit Dunham menurun sebanding dengan peningkatan L/D dan nilai kekuatan mulai konstan setelah melewati nilai rasio kritis yaitu 2,5. Grafik penurunan nilai kuat tekan pada Dolomit Dunham dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hubungan kuat tekan semu terhadap rasio ukuran L/D pada Dolomit Dunham (Mogi, 2007)

Granit Westerly menunjukkan kecenderungan nilai kuat tekan yang sama dengan dolomit, hanya dibedakan oleh fluktuasi nilai yang lebih besar. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran butir pada batuan yang lebih besar dibanding dolomit. Granit Westerly juga menunjukkan nilai kritis pada rasio $L/D=2,5$. Pada Trakit Mizuho, kekuatan batuan juga berkurang seiring bertambahnya rasio ukuran L/D dan nilai kritis terjadi pada rasio $L/D=2,5$. Berdasarkan pengujian dari ketiga jenis batuan ini, diperoleh kurva yang menunjukkan nilai rasio kritis L/D . Nilai rasio kritis ini merupakan batas rasio L/D sebelum nilai kuat tekan pada spesimen akan mendekati konstan. Kurva nilai kritis ini dapat dilihat pada Gambar 2.8. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, Mogi (2007) menyimpulkan bahwa rasio L/D pada spesimen uji memengaruhi nilai kuat tekan batuan.



Gambar 2.8 Nilai rasio kritis perubahan ukuran panjang dan diameter (L/D) spesimen (Mogi, 2007)

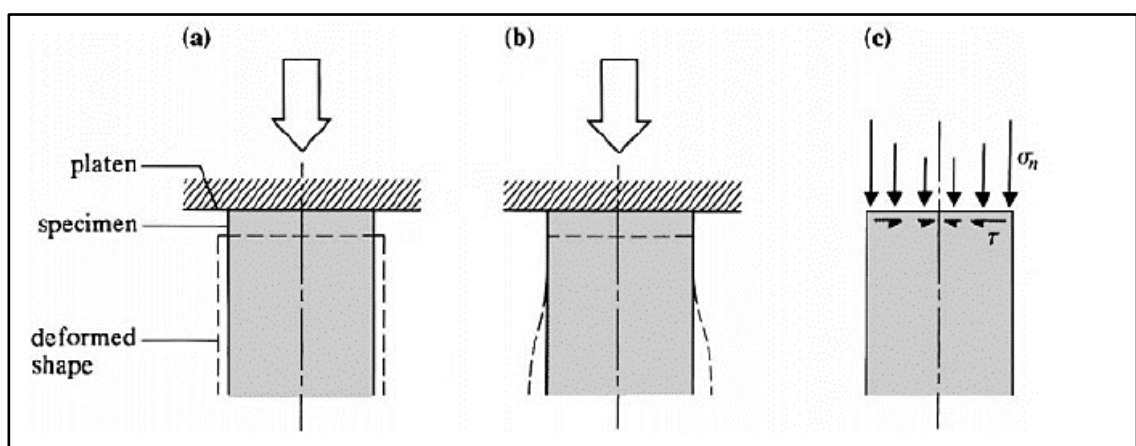
b. Temperatur

Temperatur memengaruhi nilai kuat tekan uniaksial batuan terutama nilai modulus elastisitas (E). Semakin tinggi suhu pada saat pengujian spesimen maka nilai kuat tekan uniaksial akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena

temperatur akan memengaruhi sifat duktil pada batuan. Pengaruh temperatur terhadap nilai kuat tekan batuan ditunjukkan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Zhang *et al.* (2016) pada spesimen granit dari salah satu lokasi Tambang Yanzhou, Provinsi Shandong, Cina. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kuat tekan uniaksial mencapai nilai tertinggi pada kondisi suhu tertentu dan seiring bertambahnya temperatur, nilai kuat tekan uniaksial akan semakin menurun (Zhang *et al.*, 2016).

c. Kondisi Pelat Penekan

Penyebaran tegangan pada spesimen batuan yang diberikan tegangan seharusnya searah dengan gaya yang diberikan pada spesimen batuan. Namun, pada proses pengujian, pelat yang menekan spesimen akan memberikan pengaruh terhadap spesimen sehingga ada gaya yang diterima oleh spesimen tidak searah dengan gaya yang diberikan. Hal ini yang menyebabkan bentuk keruntuhan pada spesimen hasil uji kuat tekan uniaksial tidak searah dengan gaya yang diberikan. Gambar 2.9 menunjukkan ilustrasi distribusi gaya pada spesimen dari pelat penekan.



Gambar 2.9 Distribusi gaya dari pelat penekan pada spesimen; (a) Kondisi spesimen dan pelat penekan sebelum diberi gaya; (b) Prediksi regangan yang dapat terjadi pada spesimen apabila diberi gaya tekan; (c) Distribusi gaya akibat pelat penekan (Brady *and* Brown, 2004)

d. Laju Pembebanan

Laju pembebanan memengaruhi nilai kuat tekan batuan. Nilai kuat tekan dan modulus elastisitas akan naik seiring dengan laju penekanan yang semakin meningkat. Spesimen yang diberikan beban secara menerus akan mengalami keruntuhan dalam waktu 5–10 menit setelah pembebanan dan laju tegangan yang diberikan harus 0,5–1,0 MPa/s (ISRM, 1977). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Xiu *et al.* (2020) pada material *cemented paste backfill* (CPB) berupa *tailing* silika yang dipreparasi kemudian diberikan laju pembebanan yang bervariasi menunjukkan bahwa nilai kuat tekan batuan akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju pembebanan.

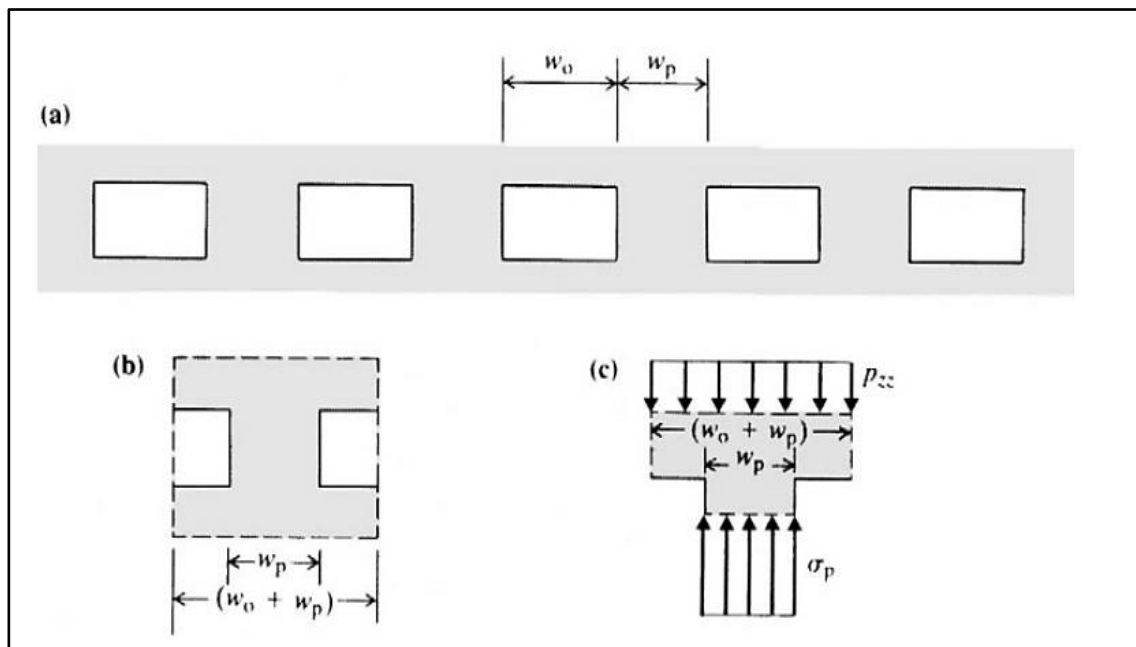
2.4 Analisis Dasar pada Pilar

Analisis dasar pada pilar dapat dibagi menjadi analisis pembebanan pilar dan analisis kekuatan pilar. Pembebanan dan kekuatan pilar saling berpengaruh untuk menentukan faktor keamanan dari suatu pilar. Berikut diuraikan mengenai analisis pembebanan dan analisis kekuatan pada pilar tambang.

2.4.1 Pembebanan Pilar

Analisis kekuatan pilar dapat dilakukan dengan menerapkan sistem keseimbangan statis yang dapat menunjukkan nilai tegangan rata-rata yang dialami oleh pilar. Tegangan rata-rata yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan kekuatan massa batuan yang digunakan sebagai pilar untuk menentukan kekuatan pilar. Analisis tegangan pilar dapat dilakukan menggunakan metode *tributary area*. *Tributary area* adalah luasan yang memengaruhi pembebanan pada pilar. Pada metode *tributary area*, diasumsikan bahwa pilar harus menahan seluruh lapisan penutup yang ada di atasnya ditambah dengan massa batuan yang berbatasan langsung dengan pilar yang tidak

memiliki penyangga karena material yang telah digali. Oleh karena itu, metode *tributary area* mempertimbangkan lebar lubang bukaan (w_o) dan lebar pilar (w_p) untuk menghitung tegangan pada pilar (Gambar 2.10 (a)). Analisis pada pilar dapat dilakukan dengan membagi pilar menjadi satu set yang terdiri dari satu bukaan dan satu pilar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 (b) (Brady *and* Brown, 2004).



Gambar 2.10 (a) Penampang material yang akan ditambang dengan ketebalan yang seragam; (b) Komponen dimensi pada pilar; (c) Gaya yang bekerja pada pilar secara aksial (Brady *and* Brown, 2004)

Gaya yang bekerja secara aksial pada pilar ditunjukkan pada Gambar 2.10 (c). Keseimbangan pada pilar akan tercapai apabila nilai tekanan σ_p dan p_{zz} sama sehingga diperoleh Persamaan 2.16.

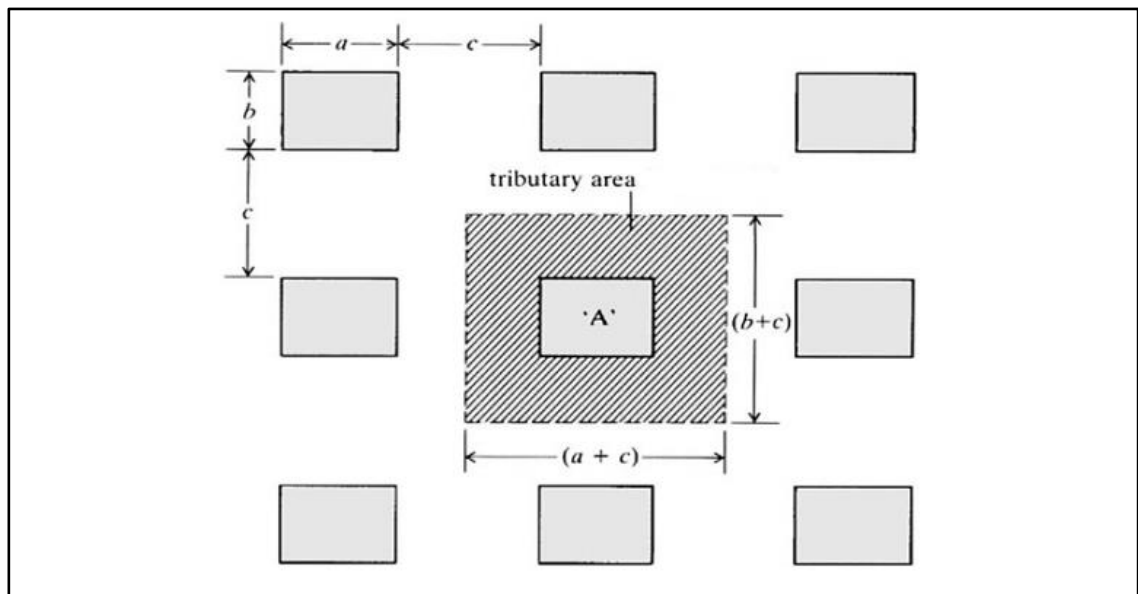
$$\sigma_p w_p = p_{zz}(w_o + w_p) \dots\dots\dots (2.16)$$

atau

$$\sigma_p = p_{zz}(w_o + w_p)/w_p \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan 2.17 menunjukkan bahwa σ_p adalah tegangan aksial rata-rata yang dialami pilar dan p_{zz} adalah gaya vertikal yang berasal dari tegangan batuan sekitar

lokasi penambangan atau dapat diuraikan sebagai ρgh , di mana ρ merupakan bobot isi batuan (kg/m^3), g merupakan percepatan gravitasi bumi (m/s^2), h adalah tinggi massa batuan yang harus ditahan oleh pilar (m), dan $(w_o + w_p)$ merupakan area bebas yang masih memberikan pengaruh terhadap pilar (*tributary area*). Dari Persamaan 2.17 dapat dilakukan analisis pembebanan rata-rata pada pilar yang memperhitungkan luas permukaan pilar dan luas daerah di sekitar pilar. Gambar 2.11 menunjukkan luasan yang masih berpengaruh terhadap suatu pilar apabila dipengaruhi oleh kondisi batuan sekitar lubang bukaan (Brady and Brown, 2004).



Gambar 2.11 Geometri *tributary area* pada pilar pada pembebanan secara uniaksial (Brady and Brown, 2004)

Gambar 2.11 menunjukkan geometri *tributary area* yang berpengaruh pada pilar A. Berdasarkan Gambar 2.11, pembebanan pada pilar dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.18 .

$$P = (a + c)(b + c)\rho gh \dots \dots \dots (2.18)$$

P merupakan tekanan yang harus ditahan oleh pilar yang berasal dari material yang berada di atas pilar. $(a + c)(b + c)$ merupakan dimensi *tributary area*, ρ merupakan

berat isi batuan per unit volume, g merupakan percepatan gravitasi bumi (m/s^2), dan h adalah tinggi massa batuan yang harus ditahan oleh pilar. Dari persamaan tekanan tersebut, nilai tegangan yang bekerja pada pilar dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.19.

$$\sigma_p = \frac{(a+c)(b+c)\rho gh}{ab} \dots\dots\dots (2.19)$$

Untuk kasus pilar yang dibuat pada lapisan yang memiliki kemiringan maka berlaku Persamaan 2.20.

$$\sigma_p = \frac{(a+c)(b+c)\rho gh}{ab} (\cos \theta + m \sin \theta) \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana θ merupakan kemiringan lapisan, dan m merupakan nisbah Poisson.

2.4.2 Kekuatan Pilar

Kekuatan pilar pada penambangan menentukan tingkat keamanan operasi penambangan yang dilakukan. Kekuatan pilar harus lebih besar dari tegangan yang bekerja pada pilar agar tidak terjadi keruntuhan pada pilar. Kekuatan pilar tergantung pada bentuk dan ukuran pilar. Semakin besar ukuran pilar maka semakin banyak struktur yang terdapat pada pilar tersebut sehingga nilai kekuatan pilar juga akan semakin menurun. Pengaruh bentuk terhadap kekuatan pilar juga bergantung pada ukuran dari pilar. Ukuran yang dimaksud adalah ukuran panjang, lebar, dan tinggi pilar (Merwe and Mathey, 2012).

Pengukuran kekuatan bawah tanah selalu berkembang dari masa ke masa, terutama pada analisis kekuatan pilar penambangan yang telah disetujui bahwa kekuatan pilar dipengaruhi oleh rasio tinggi dan lebar (H_p/W_p) pilar. Perkembangan rumusan empiris ini memiliki dua bentuk umum untuk memprediksi kekuatan pilar. Bentuk umum rumusan ini yaitu bentuk persamaan linier yang ditunjukkan pada persamaan 2.21 dan persamaan kekuatan pilar yang ditunjukkan pada persamaan 2.22.

$$S_p = S_{cube} \left(A + B \frac{w}{h} \right) \dots\dots\dots (2.21)$$

$$S_p = S_{cube} \left(\frac{w}{h}\right)^\alpha \dots\dots\dots (2.22)$$

Di mana S_p merupakan kekuatan pilar, S_{cube} merupakan kekuatan spesimen kubus yang diuji kuat tekan, w dan h merupakan lebar dan tinggi pilar, sedangkan α , A , dan B merupakan nilai konstan yang diperoleh dari data pengamatan pilar di lapangan.

Berikut merupakan beberapa persamaan yang digunakan dalam menganalisis kekuatan pada pilar (Jawed *et al.*, 2013; Verma, 2014).

a. Zern Edward Nathan (1928)

Zern Edward Nathan pada tahun 1928 melakukan penelitian pada pilar tambang dan menyatakan formula kekuatan pilar pada salah satu bukunya yang berjudul Coal Miner's Pocketbook. Hubungan empiris yang diperoleh Zern Edward Nathan (1928) dapat dilihat pada Persamaan 2.23.

$$C_p = C_1 \sqrt{\frac{w_p}{h_p}} \dots\dots\dots (2.23)$$

C_p adalah kekuatan pilar (MPa), C_1 adalah kekuatan material pilar (MPa), w_p adalah lebar pilar dalam satuan meter, dan h_p adalah tinggi pilar dalam satuan meter.

b. Obert *and* Duvall (1967)

Obert *and* Duvall (1967) mengembangkan hubungan antara kuat tekan batuan dengan rasio tinggi dan diameter spesimen. Persamaan yang diperoleh ditunjukkan pada Persamaan 2.24.

$$C_{so} = C_{10} \left[0,778 + 0,222 \left(\frac{d}{h}\right) \right] \dots\dots\dots (2.24)$$

C_{10} adalah nilai kuat tekan spesimen pada rasio $\frac{d}{h} = 1$ (MPa), d adalah diameter spesimen (mm) dan h adalah tinggi spesimen (mm). Obert *and* Duvall menyatakan bahwa penggunaan Persamaan 2.25 dapat digunakan di lapangan dengan mengganti d dan h menjadi w_p dan h_p sehingga persamaan menjadi:

$$C_p = C_{10} \left[0,778 + 0,222 \left(\frac{w_p}{h_p} \right) \right] \dots\dots\dots (2.25)$$

C_p adalah kekuatan pilar (MPa), C_{10} merupakan nilai kuat tekan spesimen (MPa), w_p adalah lebar pilar dalam satuan meter, dan h_p adalah tinggi pilar dalam satuan meter.

c. Bieniawski (1975)

Bieniawski and Van pada tahun 1975 telah melakukan pengujian tegangan *in situ* pada 66 spesimen batubara dengan ketinggian dan lebar lebih dari 2 m. Rasio yang digunakan antara 0,5 sampai 3,4 menghasilkan Persamaan 2.26.

$$C_p = k_B \left[0,64 + 0,36 \left(\frac{w_p}{h_p} \right) \right] \dots\dots\dots (2.26)$$

C_p adalah kekuatan pilar (MPa), k_B merupakan nilai kuat tekan spesimen berukuran 30 cm (MPa), w_p adalah lebar pilar dalam satuan meter, dan h_p adalah tinggi pilar dalam satuan meter.

d. Esterhuizen *et al.* (2011)

Esterhuizen melakukan penelitian pada tambang batu gamping bawah permukaan untuk mengetahui tingkat keamanan dari pilar tambang yang ada di Amerika Serikat. Berdasarkan pengamatan dari beberapa pilar tambang, Esterhuizen merumuskan persamaan kekuatan pilar yang ditunjukkan pada Persamaan 2.27.

$$C_p = 0,65 \times UCS \times LDF \times \frac{w^{0,30}}{h^{0,59}} \dots\dots\dots (2.27)$$

C_p adalah kekuatan pilar (MPa), UCS merupakan nilai kuat tekan spesimen berbentuk kubus (MPa), LFD merupakan besar bidang diskontinu pada pilar (apabila tidak terdapat bidang diskontinu pada pilar maka LDF=1 atau tidak berpengaruh pada pilar), w adalah lebar pilar dalam satuan meter, dan h adalah tinggi pilar dalam satuan meter (Esterhuizen *et al.* 2011).

e. Merwe *and* Mathey (2013)

Merwe *and* Mathey melakukan penelitian pada batubara rapuh di Afrika Selatan untuk menentukan kekuatan pada pilar batubara yang ada di lokasi tambang. Mereka menghasilkan rumus empiris yang ditunjukkan pada Persamaan 2.28. Persamaan ini merupakan persamaan yang dapat digunakan pada kondisi batubara yang normal tanpa memerhatikan kondisi cekungan air tanah dan aliran sungai (Merwe *and* Mathey, 2013).

$$C_p = \sigma \frac{w^{0,5}}{h^{0,7}} \dots\dots\dots (2.28)$$

C_p adalah kekuatan pilar, σ merupakan nilai kuat tekan spesimen batubara, w adalah lebar pilar, dan h adalah tinggi pilar.

f. Prasetyo *et al.* (2019)

Prasetyo *et al.* melakukan pengujian pada spesimen batubara untuk membuat persamaan kekuatan pilar yang baru. Penelitian ini mempertimbangkan kekuatan material batubara dengan membandingkan tingkat gesekan permukaan pada spesimen batubara. Penelitian ini menghasilkan rumus empiris seperti yang dinyatakan pada Persamaan 2.29 (Prasetyo *et al.*, 2019).

$$C_p = \sigma \left(0,12 + 0,88 \frac{w}{h} \right) \dots\dots\dots (2.29)$$

C_p adalah kekuatan pilar, σ merupakan nilai kuat tekan spesimen batubara, w adalah lebar pilar, dan h adalah tinggi pilar.

2.4.3 Faktor Keamanan Pilar

Faktor keamanan (*safety factor*) merupakan nilai perbandingan antara kekuatan suatu material dengan beban minimum yang harus ditahan oleh material tersebut untuk mencapai kondisi stabil. Faktor keamanan merupakan hal yang harus diperhatikan dalam geoteknik pertambangan, terutama pada tambang bawah permukaan. Perhitungan

faktor keamanan pada pilar dapat ditunjukkan pada Persamaan 2.30 (Merwe *and* Mathey, 2013).

$$\text{Faktor keamanan} = \frac{\text{kekuatan pilar}}{\text{tegangan pilar}} = \frac{C_p}{\sigma_p} \dots\dots\dots (2.30)$$

Menurut Keputusan Menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 Tentang pedoman pelaksanaan kaidah penambangan yang baik, nilai faktor keamanan untuk lubang bukaan dengan fasilitas tetap adalah 2,00 dan untuk fasilitas tidak tetap adalah 1,5. Nilai faktor keamanan yang berada di bawah nilai yang telah ditentukan dianggap tidak memenuhi syarat keamanan dan jika proses penambangan tetap ingin dilaksanakan maka diperlukan penguatan atau penyanggaan pada lubang bukaan untuk meningkatkan nilai faktor keamanan dari lubang bukaan.

2.5 Analisis Regresi Linier Sederhana

Analisis regresi linier merupakan analisis yang menggunakan dua variabel. Variabel pertama merupakan variabel bebas atau variabel yang memberikan pengaruh (*independent variable*) dan variabel kedua merupakan variabel terkontrol atau variabel yang dipengaruhi (*dependent variable*). Analisis regresi linier mengasumsikan hubungan kedua variabel ke dalam hubungan garis lurus (linier). Analisis regresi bertujuan untuk menentukan persamaan yang dapat merepresentasikan taksiran nilai suatu variabel (Nuryadi dkk., 2017). Persamaan ini dapat digunakan dalam menentukan pengaruh dari suatu variabel terhadap variabel lainnya (Sunyoto, 2012). Bentuk persamaan umum dari koefisien regresi dinyatakan pada Persamaan 2.31.

$$Y = a + bX \dots\dots\dots (2.31)$$

Persamaan 3.1 menyatakan bahwa a merupakan konstanta (merupakan nilai Y apabila X=0), b merupakan koefisien regresi (nilai perubahan Y apabila X mengalami perubahan), Y adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel lain (*dependent variable*),

dan X adalah variabel yang memengaruhi variabel lain (*independent variable*). Nilai koefisien regresi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.32 dan nilai konstanta dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.33 (Usman, 2012).

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (2.32)$$

$$b = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (2.33)$$

Koefisien korelasi (r) merupakan angka yang menunjukkan keeratan hubungan antara dua variabel yang saling berpengaruh. Persamaan umum koefisien korelasi ditunjukkan pada Persamaan 2.34 (Usman, 2012).

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \dots\dots\dots (2.34)$$

Rentang nilai koefisien korelasi adalah -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 2.4 menunjukkan tingkat keeratan hubungan berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sunyoto, 2012).

Tabel 2.4 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