

SKRIPSI

**ANALISIS TEGANGAN GESER BATUAN AKIBAT PENGARUH
KEKASARAN PERMUKAAN BERDASARKAN PENGUJIAN
LABORATORIUM DAN PEMODELAN NUMERIK**

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD SAFARUDDIN IKBAL AR

D621 16 306



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS TEGANGAN GESER BATUAN AKIBAT PENGARUH KEKASARAN PERMUKAAN BERDASARKAN PENGUJIAN LABORATORIUM DAN PEMODELAN NUMERIK

Disusun dan diajukan oleh

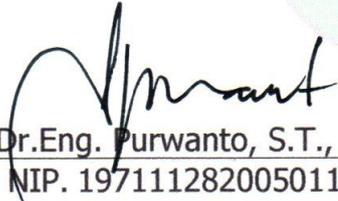
MUHAMMAD SAFARUDDIN IKBAL AR
D62116306

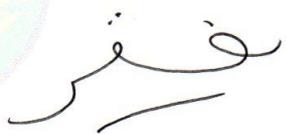
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 30 Agustus 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


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


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 : Muhammad Safaruddin Ikbal Ar
NIM : D621 16 306
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**Analisis Tegangan Geser Batuan Akibat Pengaruh Kekasaran Permukaan
Berdasarkan Pengujian Laboratorium dan Pemodelan Numerik**

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.

Gowa, 9 September 2021

Yang menyatakan



Muhammad Safaruddin Ikbal Ar

ABSTRAK

Kuat geser batuan dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal yang keberadaannya dapat menurunkan kekuatan geser pada batuan. Untuk itu penting untuk menganalisis kuat geser pada batuan yang memiliki kekar dalam melakukan perencanaan penambangan dalam penggalian. Studi ini berfokus untuk menentukan tegangan geser sampel batuan hasil uji geser langsung dengan mempertimbangkan koefisien kekasaran permukaan (JRC) sehingga dapat ditentukan hubungan antara keduanya dan memvalidasinya menggunakan pemodelan numerik. Dalam hal ini penulis menggunakan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *Phase2*. Penentuan kekasaran permukaan menggunakan koefisien Z_2 , sampel dikelompokkan menjadi beberapa set berdasarkan nilai kekasarannya. Pengujian lain yang dilakukan yakni uji sifat fisik, uji kuat tekan, dan uji Brazilian yang hasilnya digunakan sebagai karakteristik batuan dalam pemodelan. Pemodelan numerik membutuhkan karakteristik batuan berupa kuat tekan, modulus Young, nisbah Poisson, kuat tarik, sudut gesek dalam, kohesi, kekakuan normal kekar, dan kekakuan geser kekar. Hasil pengujian laboratorium dianalisis menggunakan regresi linear menunjukkan bahwa pada kondisi puncak, pengaruh JRC terhadap tegangan geser sangat kuat pada setiap pembebanan ($R^2=0,93-0,97$). Untuk kondisi residual, pengaruh yang sangat kuat hanya terjadi pada pembebanan tertinggi yakni 640 N ($R^2=0,91$). Hasil perbandingan uji geser bidang lemah dengan hasil pemodelan menunjukkan persentase kesalahan 1,4%—41,7%, nilai persentase kesalahan ini diperkirakan karena analisis yang digunakan adalah pemodelan numerik yang berbasis 2D sehingga hasil interpretasinya hanya mencakup bagian yang dijadikan penampang dari setiap sampel sedangkan uji laboratorium berbasis 3D yang mencakup seluruh permukaan bidang geser.

Kata kunci: Kuat geser, JRC, uji geser langsung, analisis regresi, pemodelan numerik.

ABSTRACT

The shear strength of rocks was influenced by internal and external factors whose presence can reduce the shear strength of rocks. Therefore, it was important to analyze the shear strength of rock that has joints in carrying out mining planning in excavations. This study was focus on determining the shear stress of rock samples resulting from direct shear tests by considering the joint roughness coefficient (JRC) so the relationship between the two can be determined and validated using numerical modeling. In this case the author uses the finite element method using Phase2 software. Determination of surface roughness using the Z_2 coefficient, the sample was grouped into several sets based on the roughness value. Other tests carried out are physical properties test, compressive strength test, and Brazilian test, the results of which were used as rock characteristics in modeling. Numerical modeling requires rock characteristics in the form of compressive strength, Young's modulus, Poisson's ratio, tensile strength, internal friction angle, cohesion, normal joint stiffness, and joint shear stiffness. Laboratory test results analyzed using linear regression showed that at peak conditions, JRC's influences on shear stress was very strong at each loading ($R^2=0.93-0.97$). For the residual condition, a very strong influences occurs only at the highest loading of 640 N ($R^2=0.91$). The results of the comparison of the weak plane shear test with the modeling results showed the error percentage of 1.4%—41.7%, this error percentage value was estimated because the analysis used was 2D-based numerical modeling so that the interpretation results only included the cross section of each sample 3D-based laboratory test covering the entire surface of the shear plane.

Keywords: Shear strength, JRC, direct shear test, regression analysis, numerical modeling.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat-Nya, penulis senantiasa diberikan petunjuk serta kemudahan hingga dapat menyusun tugas akhir ini yang berjudul "Analisis Tegangan Geser Akibat Pengaruh Kekasaran Berdasarkan Pengujian Laboratorium dan Pemodelan Numerik" sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S-1) pada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam penulis junjungkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW yang telah memberikan banyak pelajaran kepada umatnya.

Penyelesaian tugas akhir ini telah melalui banyak proses serta tantangan bagi penulis. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dan terus memotivasi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Harapan penulis yaitu tugas akhir ini dapat memberikan banyak manfaat nantinya kepada orang-orang yang membutuhkan informasi/data yang telah dihasilkan dari penelitian ini.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T selaku pembimbing utama dan Kepala LBE Geomekanika, Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang selalu mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada ibu Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T selaku pembimbing pendamping yang telah meluangkan waktunya dalam membimbing penyusunan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T dan Ibu Rizki Amalia, S.T., M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan yang membangun pada penelitian ini.

Terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak Ir. H. Djamaluddin, M.T yang telah menemani dan memberikan ilmu selama pengambilan sampel serta teman-teman yang

ikut membantu dalam pengambilan sampel yakni saudara Ainul Yaqin dan Muhammad Nur Akmal Sofyan.

Terima kasih juga kepada teman-teman LBE Geomekanik yang telah banyak membantu selama proses penyusunan tugas akhir ini yakni dalam pengerjaan sampel penelitian dan pengolahan data terkhususnya saudara Joushua Mozes Alfiano Souhoka, Mulyawan Wideasman, Gabriel Arirupa, dan Fauzan Umarah Abdillah. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada saudara seangkatan (Rockbolt 2016) serta anggota CURA-CURA SQUAD yang telah memotivasi agar segera menyelesaikan tugas akhir ini sekaligus telah menemani selama lima tahun baik suka maupun duka.

Selanjutnya penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua yang telah mencurahkan segenap cinta dan kasih sayang serta perhatian moral maupun material. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat, kesehatan, karunia, serta keberkahan di dunia dan di akhirat atas budi baik yang telah diberikan kepada penulis.

Penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi penyempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menjadi bekal ilmu pengetahuan dalam membangun wawasan khususnya dalam bidang yang berkaitan dengan geoteknik. Semoga segala amal dan kebaikannya semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini mendapatkan balasan yang berlimpah dari Tuhan Yang Maha Esa.

Gowa, Juni 2021

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Metode Penelitian.....	4
1.6 Lokasi Penelitian	6
BAB II KARAKTERISTIK BATUAN DAN KEKAR.....	7
2.1 Karakteristik Batuan	7
2.2 Fraktur pada Batuan.....	26
2.3 <i>Joint Roughness Coeficient (JRC)</i>	29
2.4 Metode Elemen Hingga	32
2.5 Analisis Regresi Linear	34

BAB III METODE PENELITIAN.....	36
3.1 Pengambilan Sampel	36
3.2 Preparasi Sampel	38
3.3 Pengamatan Kekasaran Permukaan	39
3.4 Pengujian Sifat Fisik	41
3.5 Pengujian Kuat Tekan Batuan.....	44
3.6 Pengujian Kuat Tarik Tidak Langsung Batuan.....	45
3.7 Pengujian Kuat Geser Bidang Lemah Batuan	46
3.8 Pemodelan Numerik	48
3.9 Diagram Alir Penelitian.....	52
BAB IV PENGARUH KEKASARAN PERMUKAAN TERHADAP TEGANGAN GESER.....	54
4.1 Hasil Pengamatan Kekasaran Permukaan Kekar.....	54
4.2 Hasil Uji Sifat Fisik.....	56
4.3 Hasil Uji Kuat Tekan Batuan	58
4.4 Hasil Uji Kuat Tarik Tidak Langsung Batuan	60
4.5 Hasil Uji Kuat Geser Bidang Lemah Batuan	62
4.6 Hasil Pemodelan Numerik Model Kekar	89
BAB V PENUTUP	103
5.1 Kesimpulan.....	103
5.2 Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA	105
LAMPIRAN	108
Lampiran A: Peta lokasi pengambilan sampel batuan.....	109

Lampiran B: Lembar deskripsi batuan beku	110
Lampiran C: Pengolahan data uji kuat tekan batuan	111
Lampiran D: Pengolahan data uji kuat tarik tidak langsung batuan.....	118
Lampiran E: Pengolahan data dan hasil uji kuat geser bidang lemah	121

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Komposisi batuan secara umum (Rai dkk, 2010)	7
Gambar 2.2 Skema penentuan densitas partikel dari sampel (Crawford, 2013)	9
Gambar 2.3 Bobot isi batuan beku dan metamorf (Schon, 2011).	10
Gambar 2.4 Mesin kuat tekan (LBE Geomekanika, Universitas Hasanuddin).....	13
Gambar 2.5 Konsep kuat tekan uniaksial (Jahanbakhshian, 2017)	15
Gambar 2.6 Grafik tegangan-regangan untuk batuan (Małkowski, 2018).....	16
Gambar 2.7 Metode standar penentuan modulus elastisitas (Arif, 2016).....	17
Gambar 2.8 Kisaran nilai <i>Poisson's ratio</i> dari beberapa jenis batuan (Gercek, 2007) ..	19
Gambar 2.9 Model uji Brazilian (Rai dkk, 2014).....	20
Gambar 2.10 Diagram Mohr kekuatan geser (Wyllie and Mah, 2004)	22
Gambar 2.11 Alat kuat geser (LBE Geomekanika, Universitas Hasanuddin).....	23
Gambar 2.12 Dimensi untuk pengujian kuat geser skala laboratorium (ISRM, 1974)..	25
Gambar 2.13 Hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal pada permukaan pecah untuk lima kondisi geologi yang berbeda (Wyllie dan Norrish, 1996)	28
Gambar 2.14 Profil visual standar untuk mengestimasi JRC (Barton and Choubey, 1977; Gravanish, 2019).....	30
Gambar 2.15 Perkiraan nilai JRC berdasarkan amplitudo kekasaran (Barton, 1982) ...	31
Gambar 2.16 Node dan elemen analisis 2D (Bathe, 2016).....	33
Gambar 3.1 Singkapan batuan di lokasi pengambilan sampel.....	37
Gambar 3.2 Pengamatan kekasaran permukaan (a) alat pengukur profil kekasaran, (b) sampel, dan (c) garis penampang	40
Gambar 3.3 Digitasi profil kekasaran sampel	40

Gambar 3.4	Alat dan bahan pengujian sifat fisik batuan	41
Gambar 3.5	Menimbang berat natural sampel	42
Gambar 3.6	Menjenuhkan sampel batuan	43
Gambar 3.7	Menimbang berat gantung sampel.....	43
Gambar 3.8	Geometri sampel uji geser bidang lemah.....	48
Gambar 3.9	Model sampel dan kekar.....	49
Gambar 3.10	<i>Mesh</i> dan <i>Restrain</i> pada model sampel	49
Gambar 3.11	Gaya normal dan geser pada model sampel.....	50
Gambar 3.12	Properti material dari model sampel.....	50
Gambar 3.13	Properti kekar dari model sampel	51
Gambar 3.14	Hasil interpretasi model sampel pada <i>Phase2</i>	52
Gambar 3.15	<i>Flowchart</i> penelitian	53
Gambar 4.1	Sampel kuat tekan batuan basal.....	58
Gambar 4.2	Sampel kuat tekan batuan beton.....	58
Gambar 4.3	Sampel uji kuat tarik tidak langsung	61
Gambar 4.4	Sampel setelah pengujian kuat tarik tidak langsung	61
Gambar 4.5	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 1.....	64
Gambar 4.6	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 1	65
Gambar 4.7	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 2.....	67
Gambar 4.8	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 2	68
Gambar 4.9	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 3.....	70
Gambar 4.10	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 3	71
Gambar 4.11	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 4.....	72
Gambar 4.12	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 4	73
Gambar 4.13	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 5.....	75
Gambar 4.14	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 5	76

Gambar 4.15	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 6.....	78
Gambar 4.16	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 6	79
Gambar 4.17	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 7.....	80
Gambar 4.18	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 7	82
Gambar 4.19	Grafik tegangan geser dan perpindahan horizontal sampel set 8.....	83
Gambar 4.20	Grafik tegangan geser dan tegangan normal sampel set 8	84
Gambar 4.21	Rekapitulasi hasil uji geser kondisi puncak	86
Gambar 4.22	Rekapitulasi hasil uji geser kondisi residual.....	87
Gambar 4.23	Grafik tegangan geser pada kondisi pembebanan yang sama (puncak)	87
Gambar 4.24	Grafik tegangan geser pada kondisi pembebanan yang sama (residual)	88
Gambar 4.25	Hasil interpretasi model set 1.....	91
Gambar 4.26	Hasil interpretasi model set 2.....	92
Gambar 4.27	Hasil interpretasi model set 3.....	93
Gambar 4.28	Hasil interpretasi model set 4.....	95
Gambar 4.29	Hasil interpretasi model set 5.....	96
Gambar 4.30	Hasil interpretasi model set 6.....	97
Gambar 4.31	Hasil interpretasi model set 7.....	98
Gambar 4.32	Hasil interpretasi model set 8.....	100

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Hasil interpretasi nilai koefisien determinasi (Ndruru, dkk., 2014).....	35
Tabel 4.1 Hasil pengukuran kekasaran permukaan kekar	54
Tabel 4.2 Pembagian kelas JRC.....	55
Tabel 4.3 Hasil pengukuran berat sampel natural, jenuh, gantung, dan kering.....	56
Tabel 4.4 Hasil pengujian sifat fisik batuan	57
Tabel 4.5 Hasil pengujian kuat tekan batuan dan beton	59
Tabel 4.6 Hasil pengujian kuat Tarik tidak langsung batuan dan beton	61
Tabel 4.7 Set sampel uji geser bidang lemah.....	62
Tabel 4.8 Rekapitulasi hasil uji geser bidang lemah.....	85
Tabel 4.9 Properti batuan dan kekar.....	89
Tabel 4.10 Analisis balik nilai kekakuan normal dan geser kekar	91
Tabel 4.11 Rekapitulasi hasil pemodelan uji geser dan pemodelan.....	101
Tabel 4.12 Akumulasi jumlah sampel pada interval tertentu	102

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batuan di lapangan merupakan material yang diskontinu, anisotropik, dan heterogen sehingga sifat fisik dan mekanik batuan dapat berbeda-beda bahkan untuk batuan dengan litologi yang sama. Sifat-sifat batuan ini dapat dijadikan acuan untuk mengetahui perilaku batuan ketika diberi gaya. Hal-hal tersebut dipelajari dalam cabang ilmu mekanika batuan.

Dalam pengaplikasian ilmu mekanika batuan pada masalah pertambangan, mekanika batuan tidak hanya mempelajari fraktur batuan utuh tetapi juga mempelajari perilaku geser pada bidang lemah. Kuat geser batuan adalah gaya perlawanan dari batuan terhadap tegangan yang bekerja terhadap batuan tersebut. Kuat geser batuan dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal yang keberadaannya dapat menurunkan besarnya kekuatan geser pada batuan. Salah satu faktor yang paling banyak ditemui adalah bidang diskontinu yang memisahkan blok-blok pada massa batuan. Semua batuan di lapangan memiliki bidang diskontinu seperti halnya kekar, sesar, dan bidang perlapisan (Rai et al, 2014).

Kekar pada batuan memiliki bidang kasar yang dapat menahan pergerakan blok-blok batuan. Untuk itu penting untuk menganalisis besarnya kuat geser pada batuan yang memiliki kekar dalam melakukan perencanaan penambangan dalam penggalian. Kekar pada massa batuan mengontrol kekuatan dan deformasi struktur batuan alam. Sifat rekahan yang meliputi sudut gesek dalam, dikombinasikan dengan kuat tekan kekar (*joint compressive strength*), adanya material pengisi, tegangan

normal, tekanan air, dan kekasaran permukaan memengaruhi kuat geser massa batuan (Barton, 1973; ISRM, 1978; dan Asadi, 2012).

Pada beberapa penelitian tentang pengaruh kekasaran permukaan terhadap kekuatan geser, kekasaran permukaan digambarkan dalam parameter *joint roughness coefficient* (JRC). Studi ini akan berfokus untuk menentukan tegangan geser sampel batuan dengan mempertimbangkan kondisi kekasaran permukaan sehingga dapat ditentukan hubungan antara keduanya. Sanei (2015) mengatakan metode yang paling umum digunakan untuk pengujian geser kekar pada batuan adalah uji geser langsung. Jenis pengujian ini biasa dilakukan di laboratorium, namun bisa juga dilakukan di lapangan. Uji geser langsung biasanya dilakukan pada kondisi beban normal konstan atau dalam kondisi batas kekakuan normal konstan. Kelemahan dari pengujian sampel di laboratorium yaitu batuan yang diambil menggunakan metode sampling dengan jumlah terbatas tidak dapat merepresentatifkan kondisi keseluruhan singkapan secara akurat sehingga diperlukan cara lain untuk memvalidasi hasilnya.

Perilaku geser suatu kekar merupakan kombinasi dari fenomena yang rumit seperti dilatasi normal, kekasaran permukaan dan luas kontak akibat permukaan yang bergerigi. Upaya besar telah dikhususkan untuk menjelaskan kekuatan geser dan perilaku kekar selama empat dekade terakhir. Dengan kemajuan pesat dibidang teknologi komputer, banyak upaya telah dilakukan untuk mendemonstrasikan perilaku gabungan menggunakan metode numerik seperti metode elemen hingga (Park dan Song, 2009). Pemodelan numerik dapat digunakan untuk memvalidasi hasil pengujian secara keseluruhan. Dalam hal ini penulis menggunakan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *Phase2*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diangkat pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Kekar pada batuan memiliki bidang kasar yang dapat menahan pergerakan blok-blok batuan.
2. Sampel uji geser langsung bidang lemah yang diambil menggunakan metode sampling di lapangan sangat terbatas sehingga sulit untuk merepresentasikan kondisi keseluruhan singkapan secara akurat, untuk itu diperlukan metode lain untuk memvalidasinya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilaksanakannya penelitian ini sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh koefisien kekasaran permukaan terhadap nilai tegangan geser dari sampel kekar buatan pada batuan berdasarkan uji laboratorium.
2. Memvalidasi hasil pengujian laboratorium dengan pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yaitu mengetahui seberapa besar pengaruh kekasaran permukaan pada bidang lemah batuan yang telah divalidasi menggunakan metode elemen hingga sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam pemilihan sampel dengan kekasaran tertentu yang nantinya diambil di lapangan. Penelitian ini juga dapat dirujuk sebagai referensi untuk penelitian lain yang terkait kekuatan geser bidang lemah.

1.5 Metode Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan, dari pengumpulan data, baik secara langsung maupun tidak langsung, hingga penyusunan laporan. Tahapan penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Persiapan

Tahap ini merupakan langkah awal dari penelitian berupa perencanaan topik yang akan diteliti, konsultasi dengan pembimbing akademik, dan mengumpulkan literatur terkait penelitian. Tahap persiapan berikutnya yaitu mengambil sampel pada lokasi penelitian untuk diuji. Sebelum dilakukan pengujian, sampel dipreparasi terlebih dahulu sesuai dengan ketentuan pengujian.

2. Studi pustaka

Informasi yang telah dikumpulkan dari beberapa literatur kemudian dipilih untuk dijadikan landasan atau referensi penelitian. Studi literatur merupakan tahapan yang terus dilakukan dari awal hingga akhir penelitian.

3. Pengambilan data

Rangkaian pengambilan data sebagai berikut.

- a. pengamatan kekasaran permukaan untuk mendapatkan nilai *joint roughness coefficient*;
- b. pengujian sifat fisik batuan untuk mendapatkan parameter sifat fisik sampel batuan;
- c. pengujian kuat tekan uniaksial untuk mendapatkan nilai kuat tekan, modulus Young, dan nisbah Poisson;
- d. pengujian kuat tarik tidak langsung (uji Brazilian) untuk mendapatkan nilai kuat tarik batuan; dan

- e. pengujian kuat geser langsung untuk mendapatkan nilai tegangan geser, kohesi, dan sudut gesek dalam dari kekar.

4. Pengolahan data dan analisis

Data-data penelitian yang didapatkan dari hasil pengamatan di lapangan serta pengujian di laboratorium akan diolah untuk dijadikan bahan analisis. Rangkaian pengolahan data sebagai berikut.

- a. hasil digitasi kekasaran berupa angka yang menunjukkan disubstitusi menggunakan persamaan 2.23 dan 2.25 sehingga didapatkan nilai JRC. Berdasarkan nilai JRC, sampel-sampel tersebut dibagi menjadi beberapa kelas dengan interval kekasaran tertentu untuk menentukan jumlah set yang akan diuji geser;
- b. hasil dari pengujian sifat fisik berupa berat natural, jenuh, kering, dan gantung digunakan dalam perhitungan parameter sifat fisik. Pada penelitian ini, parameter sifat fisik yang digunakan yakni berat jenis batuan;
- c. hasil regangan aksial, lateral 1, dan lateral 2 pada pengujian kuat tekan batuan diplot dengan nilai gaya yang terbaca sehingga didapatkan nilai kuat tekan, modulus Young, dan nisbah Poison;
- d. hasil regangan aksial pada pengujian kuat tarik tidak langsung diplot dengan nilai gaya yang terbaca sehingga didapatkan nilai kuat tarik;
- e. hasil pengujian geser berupa gaya geser dan perpindahan vertikal diplot dengan nilai perpindahan horizontal sehingga dapat ditentukan nilai kohesi dan sudut gesek dalam dari masing-masing set;
- f. nilai berat jenis, kuat tekan, kuat tarik, modulus Young, nisbah Poison, kohesi, dan sudut gesek dalam digunakan sebagai parameter *input* material

pada pemodelan numerik. Sedangkan nilai JRC dan JCS digunakan sebagai parameter *input joint*.

Analisis data pada penelitian ini menggunakan nilai tegangan geser, kohesi, dan sudut gesek dalam dari uji laboratorium yang dianalisis menggunakan korelasi linear sederhana sehingga didapatkan pengaruh dari kekasaran permukaan sampel. Analisis data lain yakni rata-rata persentase kesalahan mutlak menggunakan nilai tegangan geser hasil uji laboratorium dan tegangan geser hasil pemodelan numerik sehingga dapat diketahui persentasenya.

5. Kesimpulan dan saran

Hasil dari penelitian disimpulkan untuk menjawab rumusan masalah penelitian dan tujuan yang telah dicapai. Kemudian agar dapat mengembangkan penelitian menjadi lebih baik, diberikan saran pada akhir penelitian.

1.6 Lokasi Penelitian

Lokasi pengambilan sampel secara administratif terletak di Kecamatan Parang Loe, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Stasiun pengambilan sampel terletak pada koordinat $5^{\circ}15'24''$ S dan $119^{\circ}35'3''$ E. Stasiun pengambilan sampel merupakan lereng yang memiliki kemiringan sebesar 40° . Untuk sampai di lokasi penelitian, diperlukan waktu perjalanan 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 pengujian sampel pada penelitian ini dilakukan di *Workshop* dan Laboratorium Geomekanika Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

BAB II

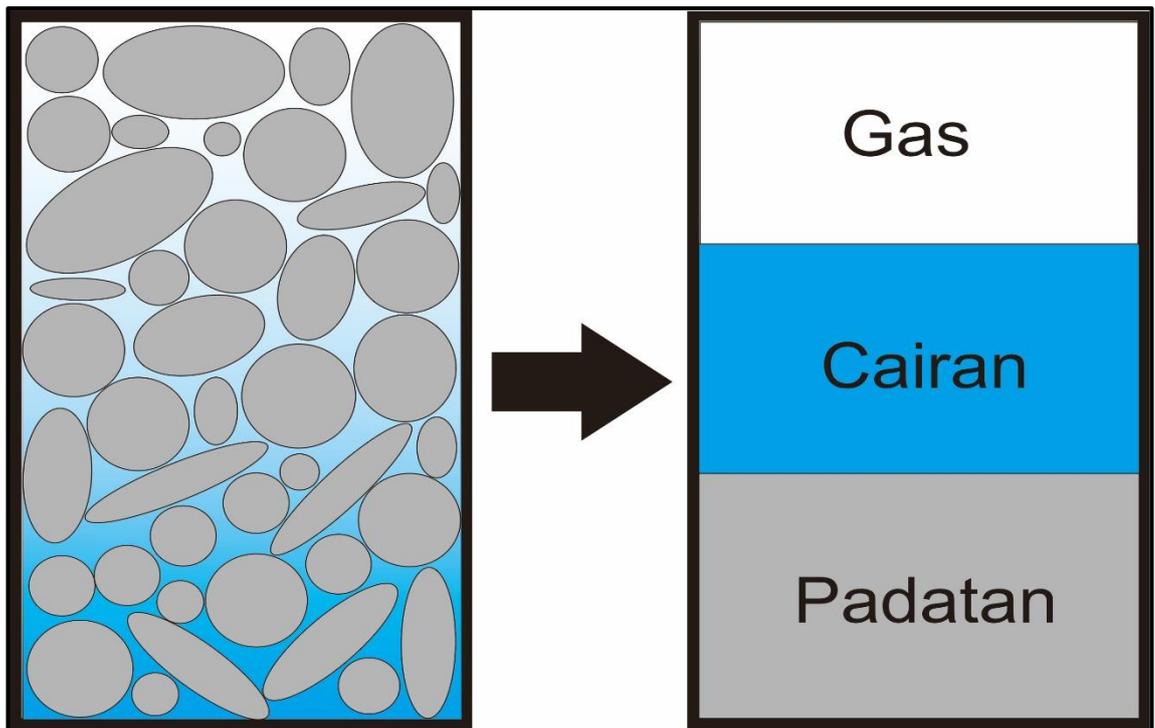
KARAKTERISTIK BATUAN DAN KEKAR

2.1 Karakteristik Batuan

Batuan adalah agregat kohesif padat yang terbentuk secara alami dari satu atau lebih mineral (Mibey, 2014). Secara umum karakteristik batuan dalam mekanika dapat dibagi menjadi dua yaitu sifat fisik dan sifat mekanik batuan. Kedua karakteristik inilah yang sering digunakan dalam rekayasa batuan.

2.1.1 Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik merupakan karakteristik dasar batuan yang memengaruhi perilaku batuan. Perbedaan komposisi padatan, air, dan udara dari setiap batuan menyebabkan terjadinya perbedaan perilaku tersebut yang pada akhirnya berkaitan erat dengan kekuatan batuan saat dilakukan pengujian sifat mekanis.



Gambar 2.1 Komposisi batuan secara umum (Rai dkk, 2010)

Uji sifat fisik berguna sebagai data pendukung dari batuan yang akan diuji. Apabila hasil dari uji sifat fisik batuan yang diuji menunjukkan ketidakseragaman, hal ini menjadi indikasi tidak meratanya kekuatan batuan atau dengan kata lain batuan yang diuji sangat bervariasi (Arif, 2016). Prosedur pengujian sifat fisik sebagai berikut:

- a. Timbang massa batuan natural (W_n)
- b. Batuan dijenuhkan menggunakan desikator selama 24 jam lalu ditimbang (W_w)
- c. Timbang massa batuan jenuh dalam kondisi tergantung di dalam air (W_s)
- d. Contoh batuan jenuh dikeringkan di dalam oven selama 24 jam pada suhu $\pm 90^\circ\text{C}$
- e. Timbang massa batuan kering (W_o)

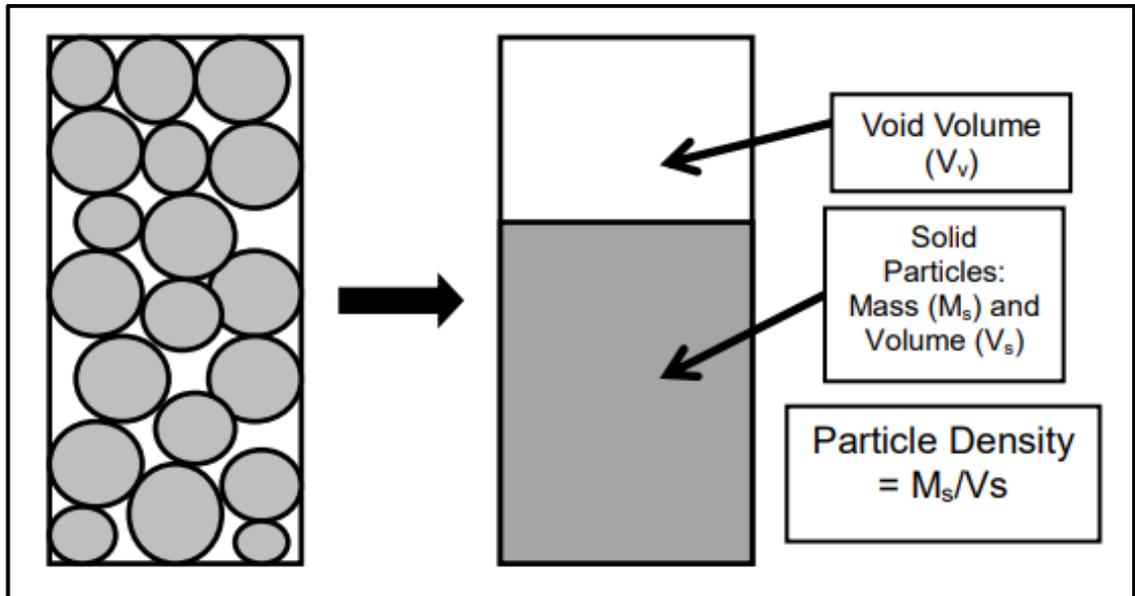
Sifat fisik batuan terdiri dari:

1. Bobot isi

Bobot isi merupakan perbandingan antara massa batuan terhadap volume total batuan tersebut. Batuan pada umumnya tidak hanya tersusun oleh massa padat, namun juga mengandung gas dan air. Pada kondisi natural, sampel batuan yang padat biasanya mengandung gas dan air. Pada kondisi jenuh, gas pada sampel batuan dikeluarkan dan ruang kosong diisi oleh air, sehingga sampel batuan yang padat diharapkan hanya mengandung air. Sedangkan pada sampel batuan yang kering, kandungan air diuapkan dengan cara dipanaskan di dalam oven.

Pada batuan beku, bobot isi meningkat dari jenis batuan beku asam hingga batuan beku basa, setiap jenis batuan menunjukkan kisaran nilai densitas. Dibandingkan dengan kebanyakan batuan sedimen, kisaran bobot isinya relatif lebih kecil dari pada batuan beku, ini merupakan hasil variasi komposisi batuan tertentu dan pengaruh volume pori atau rekahan yang sangat kecil. Sedangkan bobot isi batuan

metamorf sangat dipengaruhi oleh komposisi dan kepadatan bahan batuan pembentuk, derajat metamorfosis, serta kondisi termodinamika. (Schon, 2011).



Gambar 2.2 Skema penentuan densitas partikel dari sampel (Crawford, 2013)

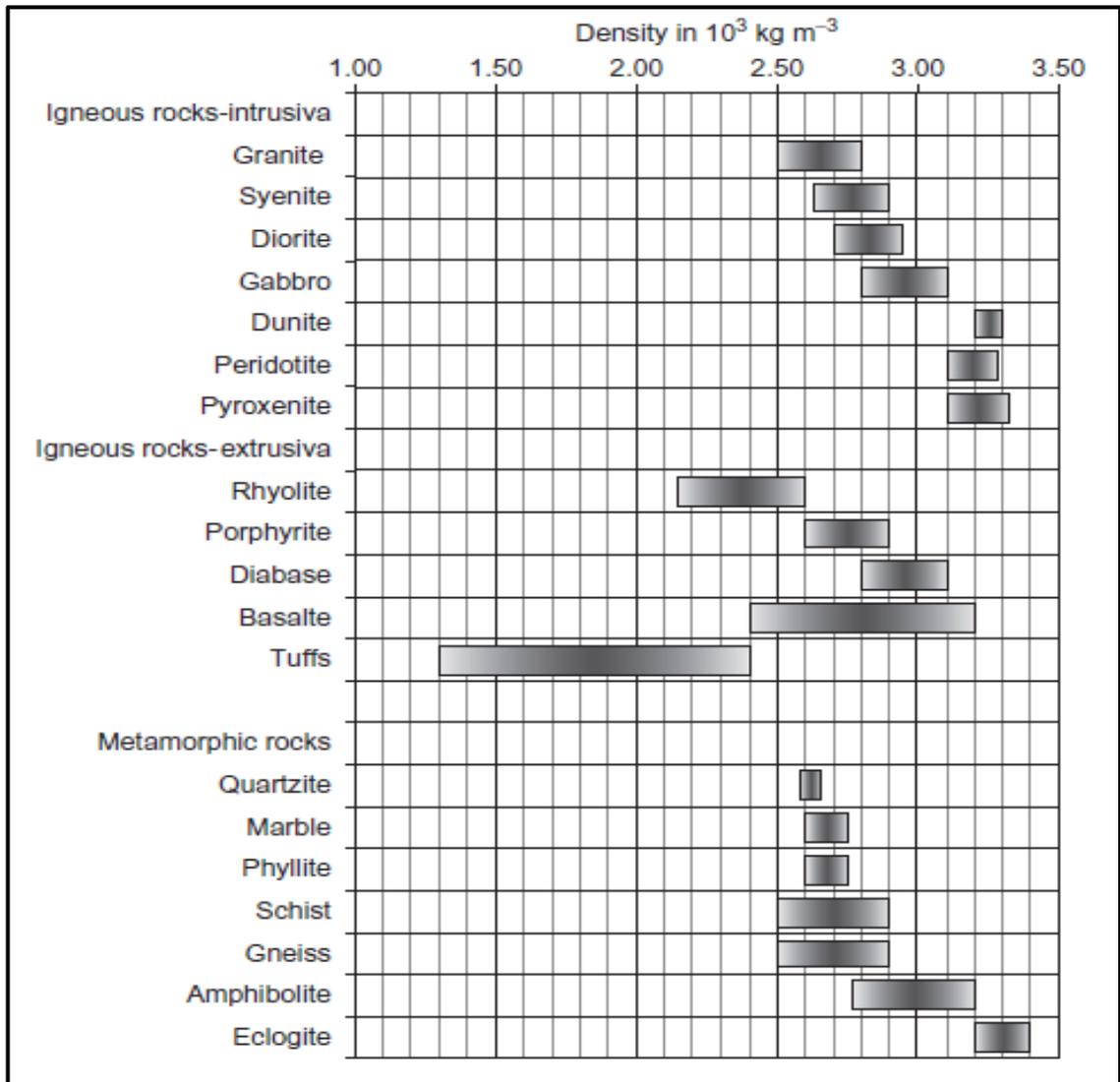
Untuk jenis batuan sedimen, umumnya terdapat kisaran nilai densitas yang besar yang mencerminkan variasi porositas dan saturasi. Nilai tertinggi mewakili kepadatan batuan (porositas rendah), sedangkan nilai yang lebih rendah dihasilkan dari peningkatan porositas atau peningkatan kandungan gas dalam pori-pori.

Bobot isi dibedakan menjadi tiga yaitu bobot isi natural (*natural density*), bobot isi kering (*dry density*), dan bobot isi jenuh (*saturated density*):

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

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

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



Gambar 2.3 Bobot isi batuan beku dan metamorf (Schon, 2011).

2. Berat jenis

Berat jenis merupakan perbandingan antara bobot isi padatan pada batuan dengan bobot isi air yang dapat menyatakan seberapa berat batuan apabila dibandingkan dengan air. Berat jenis adalah massa jenis suatu zat dibagi dengan massa jenis air sehingga berat jenis menjadi bilangan tak bersatuan. Perubahan suhu mempengaruhi massa jenis air, sehingga terjadi perbedaan antara massa jenis dan berat jenis bahan yang diuji. Berat jenis dibedakan menjadi dua yaitu berat jenis asli (*true spesific grafitiy*) dan berat jenis semu (*apparent specific gravity*).

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

$$\text{Berat jenis asli} = \frac{\frac{W_o}{W_o - W_s}}{\text{Bobot isi air}} \dots\dots\dots (2.5)$$

3. Kadar air

Kadar air adalah rasio perbandingan antara massa air yang terkandung dalam ruang pori material tanah atau batuan terhadap massa partikel padat. Kandungan air dinyatakan dalam bentuk persentase (ASTM, 2011). Kadar air dibedakan menjadi dua yaitu kadar air asli (*natural water content*) dan kadar air jenuh (*saturated water content*).

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

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

4. Derajat kejenuhan

Derajat kejenuhan merupakan perbandingan antara kadar air natural dengan kadar air jenuh. Hal ini menyatakan seberapa banyak air yang terkandung dalam batuan natural jika dibandingkan dengan jumlah maksimum air yang dapat mengisi batuan. Wang (2016) telah melakukan pengujian pengaruh derajat kejenuhan terhadap kekuatan geser tanah, hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 2.4 menunjukkan terjadi penambahan tegangan geser ketika terjadi penurunan kadar air sampel.

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

5. Porositas

Porositas merupakan perbandingan antara volume pori yang ada pada batuan terhadap volume total batuan. Batuan dibentuk oleh kristalisasi lelehan atau pengendapan sedimen di sungai, danau atau laut awalnya mengandung beberapa porositas primer. Porositas ini dapat berubah dengan berbagai proses seperti

deformasi (termasuk rekahan), metamorfisme, perubahan hidrotermal, diagenesis dan pelapukan, menghasilkan porositas sekunder. Porositas berubah secara signifikan bahkan untuk jenis batuan yang sama karena faktor-faktor yang berbeda seperti distribusi ukuran butir, bentuk butir, serta kedalaman dan tekanan (Anovitz, 2015).

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

6. Angka pori

Angka pori atau *void ratio* merupakan perbandingan antara volume rongga dengan volume padatan. Angka pori tidak memiliki dimensi dan sangat berhubungan erat dengan porositas. Persamaan yang digunakan untuk menghitung angka pori adalah sebagai berikut:

$$\text{Void ratio (e)} = \frac{n}{1-n} \dots\dots\dots (2.10)$$

di mana e adalah angka pori dan n adalah porositas.

2.1.2 Sifat Mekanik Batuan

Pengujian sifat mekanik batuan merupakan pengujian sampel yang bersifat *destruktif*. Sama halnya dengan pengujian sifat fisik, pengujian sifat mekanik memerlukan preparasi sampel yang sesuai dengan standar. Sifat mekanik yang diteliti pada penelitian ini yaitu; kuat tekan uniaksial, modulus elastisitas, nisbah Poisson, kuat tarik, dan kuat geser.

1. Kuat tekan uniaksial

Kuat tekan uniaksial (UCS) adalah salah satu sifat mekanik batuan yang banyak digunakan dalam berbagai proyek teknik untuk mengevaluasi stabilitas struktur terhadap beban. Penentuan UCS menuntut adanya sampel inti berkualitas tinggi yang tidak selalu dapat disediakan karena adanya batuan yang lemah, retak, dan berfoliasi (Gholami dan Fakhari, 2017). Untuk mengetahui nilai kuat tekan batuan, perlu dilakukan pengujian pada sampel yang tidak memiliki bidang lemah. Pengujian kuat

tekan dari batuan biasanya menggunakan alat kuat tekan yang menekan batuan dari satu arah. Hasil dari pengujian kuat tekan batuan yaitu nilai kuat tekan, modulus elastisitas, dan nisbah Poisson.

Prosedur untuk mengukur kuat tekan uniaksial telah distandarisasi oleh *American Society for Testing and Materials (ASTM)* dan *International Society for Rock Mechanics (ISRM)*. Meskipun metodenya relatif sederhana, namun memakan waktu dan cukup mahal serta membutuhkan inti batuan yang dipersiapkan dengan baik, seringkali sulit untuk mendapatkan inti batuan yang lemah dan terutama untuk serpih.



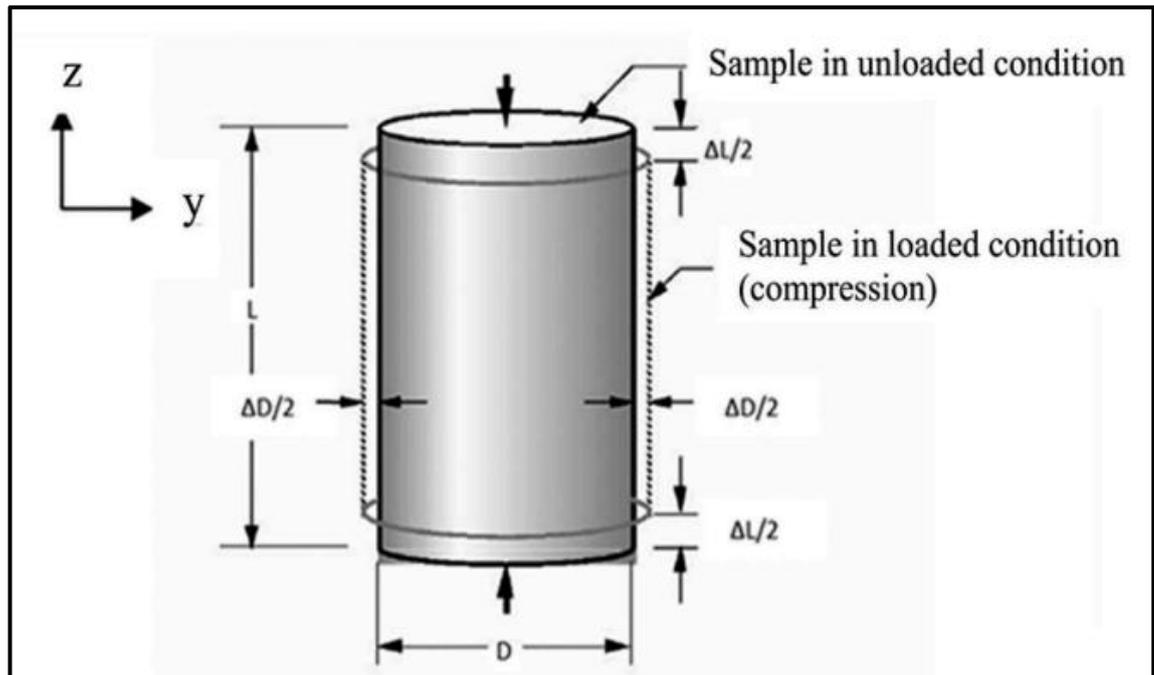
Gambar 2.4 Mesin kuat tekan (LBE Geomekanika, Universitas Hasanuddin)

Prosedur untuk pengujian kuat tekan uniaksial menggunakan mesin kuat tekan yaitu (ISRM, 1979):

- a. sampel uji harus berbentuk silinder sirkular yang memiliki rasio tinggi terhadap diameter 2–2,5 cm dan diameter sebaiknya tidak kurang dari ukuran inti, kira-kira 54 mm. Diameter sampel setidaknya harus 10 kali ukuran butiran terbesar di batuan;
- b. ujung sampel harus rata ($\pm 0,02$ mm) dan tegak lurus terhadap sumbu spesiimen dengan penyimpangan lebih dari 0,001 rad atau 0,05 mm dalam 50 mm;
- c. sisi-sisi sampel harus halus dan bebas dari ketidakraturan;
- d. penggunaan bahan *capping* atau perawatan permukaan selain penggunaan mesin tidak diizinkan;
- e. sampel harus disimpan tidak lebih dari 30 hari, sedemikian rupa untuk menjaga kadar air alami dan diuji dalam kondisi tersebut;
- f. beban pada sampel harus diterapkan secara kontinu pada laju tegangan konstan sehingga kegagalan akan terjadi dalam 5–10 menit pembebanan, sebagai alternatif laju pembebanan harus dalam batas $0,5–1,0$ MPa s^{-1} ;
- g. beban maksimum pada sampel harus dicatat dalam satuan newton;
- h. harus ada setidaknya lima kali pengulangan untuk setiap pengujian.

Kuat tekan uniaksial dari sampel dapat dihitung dengan membagi beban maksimum (P) yang diterapkan pada sampel saat terjadi *failure* dengan luas penampang dari sampel (A).

$$\text{Kuat tekan } (\sigma_t) = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.11)$$

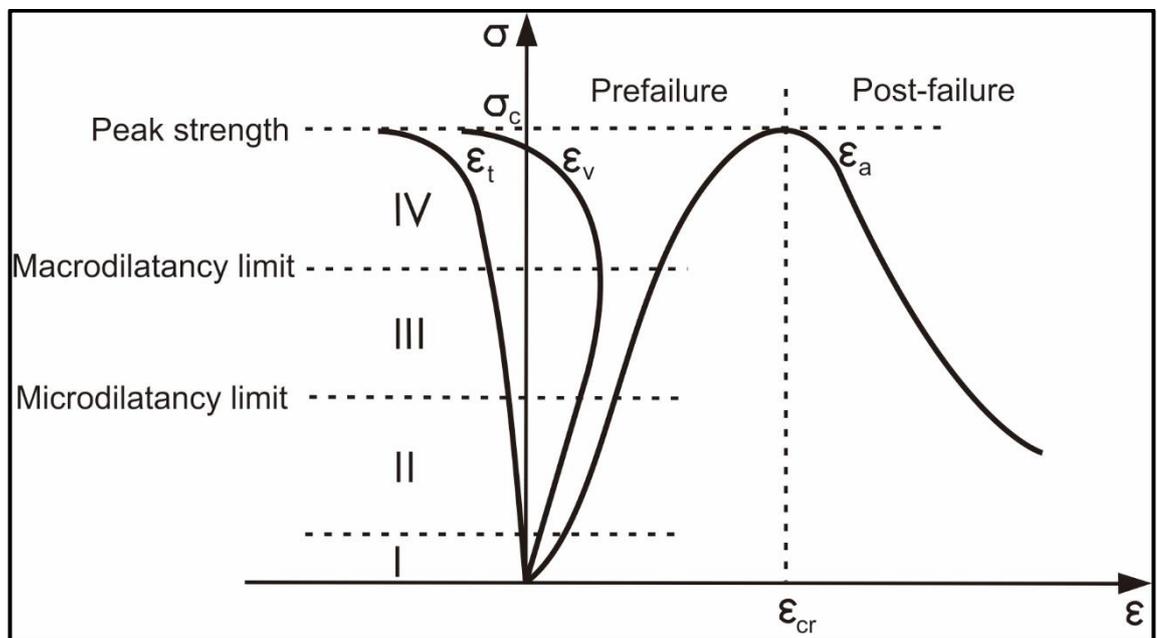


Gambar 2.5 Konsep kuat tekan uniaksial (Jahanbakhshian, 2017)

Dalam proses pengujian, perilaku batuan elastis dapat diamati dan diukur dengan baik sampai pada titik retakan mulai merambat dan mengubah deformasi menjadi plastik. Umumnya empat fase deformasi batuan sebelum keruntuhan dan satu fase di luar kekuatan puncak (pasca keruntuhan) dapat diidentifikasi. Tahapan tersebut didefinisikan sebagai berikut (Małkowski, 2018):

- a. Fase pemadatan (I) - retakan yang sudah ada sebelumnya dan pori-pori antar butir menutup saat beban naik. Kurva tegangan-regangan bisa linier atau non-linier karena kerapatan retakan mikro primer dan geometrinya;
- b. Fase deformasi elastik linier (II) - deformasi elastik mendominasi fase ini, tetapi beberapa perilaku non-linier mungkin terjadi. Kurva tegangan-regangan cenderung linier;
- c. Fase rekahan stabil (III) - awal dari fase ini adalah batas dilatasi material mikro ketika pemisahan retakan dan perambatannya dalam arah paralel dengan arah tegangan tekan utama. Kurva tegangan—regangan untuk deformasi volumetrik dan transversal berhenti menjadi linier. Emisi akustik meningkat;

- d. Fase rekahan tidak stabil (IV) - melewati batas dilatasi makro, terjadi pembukaan retakan kemudian terjadi pergeseran retakan dan perambatannya tidak stabil. Melalui peningkatan dan penggabungan retakan maka akan terbentuk permukaan geser. Terbukanya retakan menyebabkan volume batuan meningkat dengan cepat. Semua kurva tegangan-regangan menjadi nonlinier dan peningkatan tajam emisi akustik dapat diamati. Fase berakhir ketika tekanan mencapai kekuatan puncak;
- e. Fase degradasi batuan (V) - permukaan geser makro terbentuk dan kemudian terjadi keruntuhan.



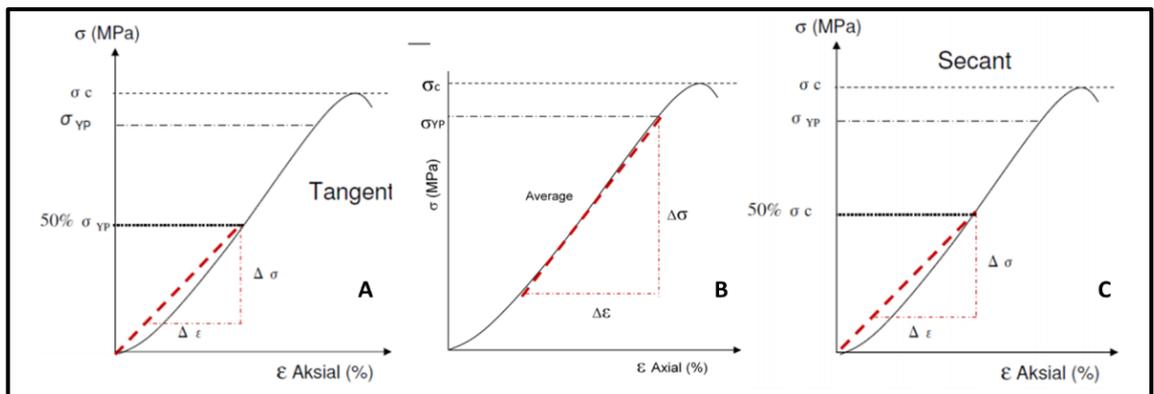
Gambar 2.6 Grafik tegangan-regangan untuk batuan (Małkowski, 2018)

2. Modulus elastisitas

Kisaran semua fase pada Gambar 2.6 bergantung pada jenis batuan. Jenis batuan ditentukan oleh komposisi mineral dan struktur serta tekstur batuan (Bell dan Lindsay, 1999; Roshan dkk, 2016; Rybacki dkk, 2015; Sabatakakis dkk, 2008). Sebagai contoh, batuan beku dengan porositas rendah, terbentuk pada tekanan dan temperatur tinggi, tidak menunjukkan fase pemadatan (I) dengan kurva tegangan-

regangan linier yang panjang. Batuan sedimen yang terbentuk dalam kondisi yang berbeda, biasanya oleh pengendapan sisa-sisa batuan lain yang lapuk atau oleh akumulasi dan konsolidasi sedimen, sehingga menunjukkan sifat elastis yang sangat kecil selama pembebanannya. Mempertimbangkan bahwa batuan sedimen seperti batupasir, batulempung atau serpih menutupi sebagian besar permukaan bumi, pengetahuan tentang perilaku mereka selama pembebanan menjadi sangat penting (Małkowski, 2018). Persamaan untuk menentukan modulus elastisitas adalah:

$$\text{Modulus Elastisitas (E)} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \dots\dots\dots (2.12)$$



Gambar 2.7 Metode standar penentuan modulus elastisitas (Arif, 2016)

Kurva tegangan-regangan untuk deformasi aksial adalah cara terbaik untuk menguji elastisitas batuan dan untuk menentukan modulus elastisitas (*modulus Young*). *International Society of Rock Mechanics* (ISRM) menyarankan tiga standar untuk penentuannya. Standarnya sebagai berikut:

- a. *Tangent Young's modulus*, diukur pada tingkat tegangan = 0 sampai tegangan tertentu, biasanya $50\% \sigma_{yp}$ (Gambar 2.7a);
- b. *Avarage Young's modulus*, diukur dari rata-rata kemiringan kurva atau bagian linear yang terbesar dari kurva (Gambar 2.7b);
- c. *Secant Young's modulus*, diukur dari tegangan = 0 sampai nilai tegangan tertentu, biasanya $50\% \sigma_c$ (Gambar 2.7c).

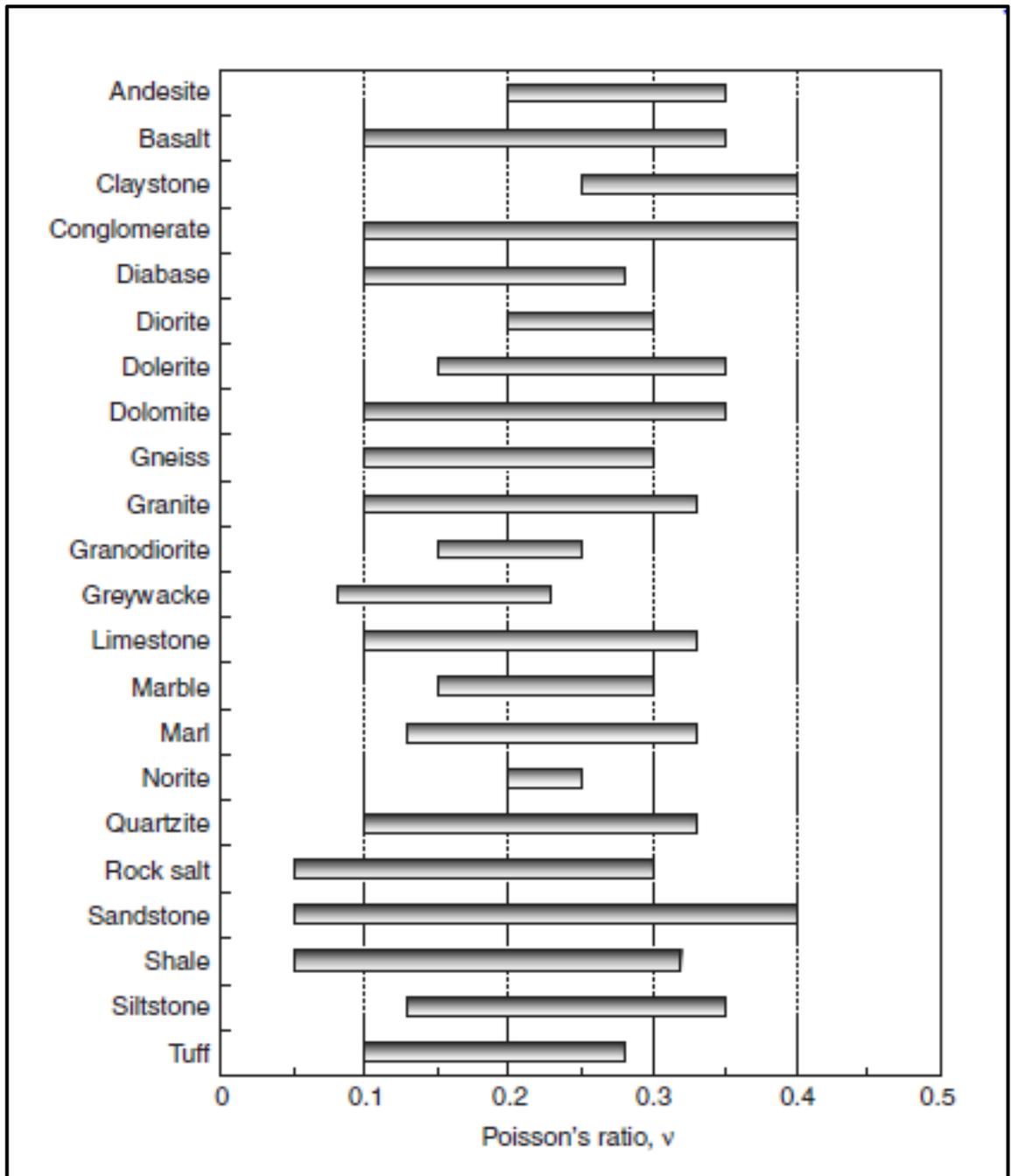
3. Nisbah Poisson

Nisbah Poisson merupakan perbandingan antara regangan lateral dengan regangan aksial. Untuk sebagian besar batuan utuh, nilainya berada di antara 0,25 dan 0,35. Nilai tersebut digunakan dalam berbagai cara untuk analisis numerik tetapi, umumnya, setiap peningkatan tegangan vertikal akan disertai dengan peningkatan tegangan horizontal (Hencher, 2015).

$$\text{Nisbah Poisson} = -\frac{\Delta Lateral}{\Delta Axial} \dots\dots\dots (2.13)$$

Karena nisbah Poisson adalah sifat mekanik yang berperan dalam deformasi bahan elastis, rasio ini digunakan dalam masalah di bidang geoteknik yang terkait dengan deformasi batuan, misalnya itu adalah input komputasi yang diperlukan untuk analisis tegangan numerik. Beberapa kasus dengan nilai nisbah Poisson negatif atau lebih besar dari 0,5 mungkin terjadi dikarenakan batuan yang sangat anisotropik; terdapat kasus di mana retakan mikro yang diinduksi secara termal pada granit menyebabkan nisbah Poisson negatif dalam kompresi dan tegangan.

Oleh karena itu untuk batuan isotropik, nilai nisbah Poisson secara praktis antara 0 dan 0,5. Padahal kisaran yang dibatasi oleh nilai 0,05 dan 0,45 mencakup sebagian besar batuan. Selain itu, dalam beberapa aplikasi teknik batuan dengan data lapangan terbatas, nilai antara 0,2 dan 0,3 adalah perkiraan umum untuk nisbah Poisson (Gercek, 2007).

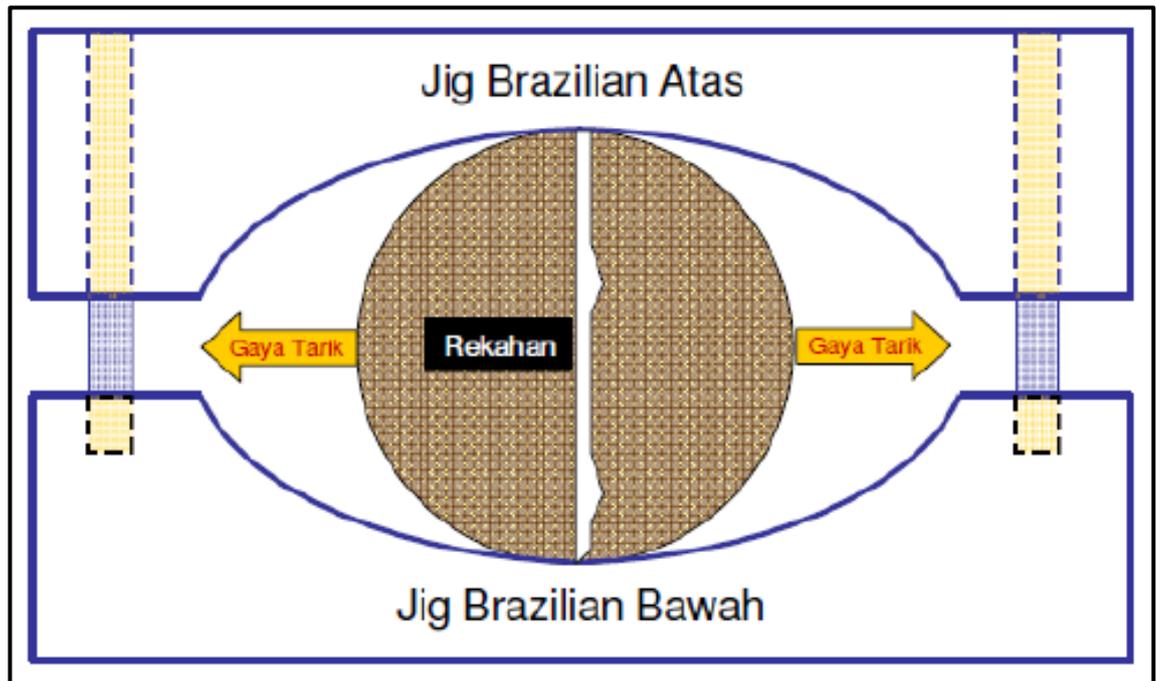


Gambar 2.8 Kisaran nilai *Poisson's ratio* dari beberapa jenis batuan (Gercek, 2007)

4. Kuat tarik

Kuat tarik merupakan nilai tegangan maksimum yang dikembangkan oleh suatu contoh material dalam suatu pengujian tarikan yang dilakukan untuk memecah batuan dibawah kondisi tertentu. Pengujian kuat tarik batuan dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu uji kuat tarik langsung dan uji kuat tarik tidak langsung (uji Brazilian).

Namun uji kuat tarik yang lebih banyak digunakan adalah tipe kuat tarik tidak langsung (Gambar 2.9).



Gambar 2.9 Model uji Brazilian (Rai dkk, 2014)

Uji brazilian merupakan metode pengujian tidak langsung sederhana untuk mendapatkan kekuatan tarik material rapuh seperti beton dan batuan (Li, 2013). Hal ini terkait dengan beberapa kendala yang biasa dihadapi saat melakukan uji kuat tarik langsung, misalnya kesulitan dalam melakukan penjepitan (*gripping*) sehingga dipertanyakan bagaimana cara menempelkan contoh pada pegangan tanpa merusak permukaan contoh, maupun membuat beban yang bekerja berada pada posisi paralel dengan sumbu contoh batuan. Prosedur pengujian kuat tarik tidak langsung (uji Brazilian) yang disarankan oleh ISRM 1978 yaitu;

- a. sampel harus dipotong dan disiapkan dengan menggunakan air bersih. permukaan silinder harus bebas dari tanda pahat yang terlihat jelas dan ketidakteraturan di sepanjang ketebalan sampel ($<0,025$ mm). permukaan ujung harus rata sepanjang 0,25 mm dan persegi dan sejajar dalam $0,25^\circ$;

- b. orientasi sampel harus diketahui dan kadar air dikontrol atau diukur dan dilaporkan;
- c. diameter sampel tidak boleh kurang dari ukuran inti, kira-kira 54 mm, dan ketebalannya harus kira-kira sama dengan jari-jari sampel;
- d. sampel harus dililitkan di sekelilingnya dengan satu lapisan selotip penutup dan dipasang tepat pada peralatan uji sedemikian sehingga pelat lengkung memuat benda uji secara diameter dengan sumbu rotasi untuk benda uji tepat di alat;
- e. beban pada sampel harus diberikan secara kontinyu dengan kecepatan konstan sehingga *failure* pada batuan terlemah terjadi dalam waktu 15—30 detik. laju pembebanan 200 n/s direkomendasikan;
- f. jika mesin uji dilengkapi dengan pencatatan gaya/perpindahan, catatan harus diambil selama pengujian sehingga beban untuk rekahan primer dapat ditentukan secara tepat (dalam beberapa kasus beban terus meningkat setelah *failure* primer karena sampel yang terbelah masih menanggung beban). jika pencatatan gaya/perpindahan tidak tersedia pada mesin uji, operator harus berhati-hati untuk mendeteksi beban pada saat terjadi *failure* primer. pada *failure* primer akan ada jeda singkat dalam gerakan jarum indikator. namun perbedaan antara beban pada *failure* primer dan daya dukung beban puncak paling banyak hanya sekitar 5%;
- g. jumlah sampel yang diuji harus ditentukan dari pertimbangan praktis, tetapi biasanya yang direkomendasikan adalah sepuluh.

Tekanan yang menginduksi tegangan tarik ke diameter sampel searah vertikal pada dasarnya konstan di wilayah sekitar pusat. Kuat tarik tidak langsung biasanya dihitung berdasarkan asumsi bahwa terjadi *failure* pada titik tegangan tarik maksimum, yaitu di tengah cakram. Rumus yang disarankan untuk menghitung kekuatan tarik belah σ_t (MPa) berdasarkan uji Brazilian adalah (ASTM 2008):

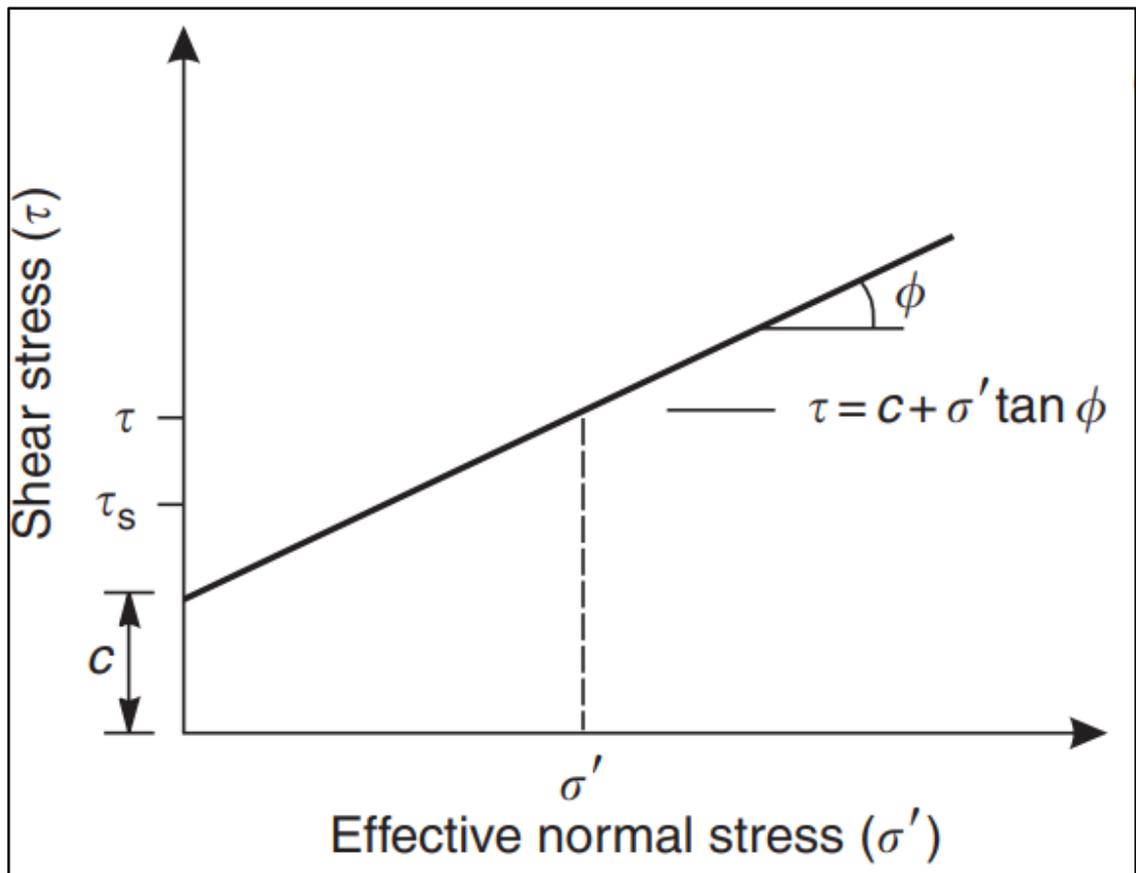
$$\text{Kuat tarik } (\sigma_t) = \frac{2P}{\pi Dt} = 0,636 \frac{P}{Dt} \dots\dots\dots (2.14)$$

P adalah beban saat *failure* (N), D adalah diameter benda uji (mm), dan t adalah ketebalan benda uji yang diukur di bagian tengah (mm).

5. Kuat geser

Kuat geser batuan adalah besarnya tegangan geser maksimum yang dapat diterima oleh struktur internal batuan tanpa menyebabkan bidang geser pada batuan dapat mengalami *failure*. Untuk sebagian besar *failure* pada batuan dapat diasumsikan sebagai material Mohr-Coulomb. Nilai kuat geser batuan dapat ditentukan melalui uji kuat geser batuan. Hasil yang diperoleh setelah melakukan uji kuat geser yaitu parameter mekanik batuan yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Formula kuat geser dapat dilihat pada persamaan berikut (Wyllie and Mah, 2004)

$$\text{Tegangan geser menurut Mohr-Coulomb } (\tau) = c + \sigma_n \tan\phi \dots\dots\dots (2.15)$$



Gambar 2.10 Diagram Mohr kekuatan geser (Wyllie and Mah, 2004)

Faktor-faktor tersebut dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu faktor intrinsik dan ekstrinsik. Faktor intrinsik merupakan faktor yang menunjukkan karakteristik internal batuan, terdiri dari kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) yang diperoleh dari hasil uji geser langsung. Faktor ekstrinsik merupakan faktor yang berasal dari lingkungan batuan baik yang alami maupun tidak serta yang dapat dikontrol maupun yang tidak dapat dikontrol oleh manusia. Faktor-faktor tersebut antara lain tegangan normal, keberadaan dan tekanan air, mineralogi dan ukuran butir, kekasaran permukaan geser, banyaknya bidang diskontinu, keberadaan material pengisi pada rekahan, dan laju pembebanan geser (Martireni, 2017). Graselli (2001) juga menyebutkan faktor lain yang mempengaruhi kuat geser batuan yaitu arah gaya geser dan distribusi bukaan *joint*.



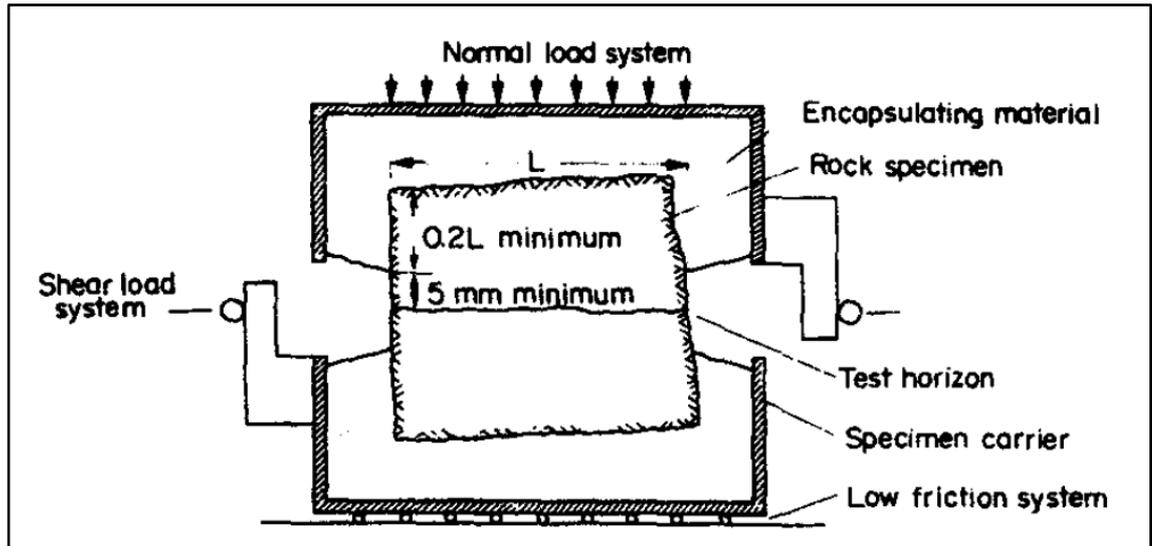
Gambar 2.11 Alat kuat geser (LBE Geomekanika, Universitas Hasanuddin)

Alat uji kuat geser skala laboratorium dapat digunakan untuk menentukan sudut gesek dalam (ϕ) dan kohesi (c). Gambar 2.11 adalah mesin dengan penggunaan

lengan tuas mekanis untuk memastikan bahwa beban normal pada sampel tetap konstan sepanjang pengujian. Hal ini merupakan pertimbangan praktis yang penting karena sulit untuk mempertahankan beban normal yang konstan dalam sistem yang dikontrol secara hidrolik atau pneumatik dan ini mengakibatkan sulit untuk melakukan pembacaan data uji. Perlu diperhatikan bahwa dalam menyiapkan sampel, harus sangat hati-hati untuk memastikan bahwa permukaan geser disejajarkan secara akurat untuk menghindari perlunya koreksi sudut tambahan.

Prosedur yang digunakan dalam menentukan kuat geser batuan dan pergerakan dari material batuan telah diberikan oleh *Internasional Society for Rock Mechaics Commision on Standardization of Laboratory and Field Test* tahun 1974.

- a. bidang lemah yang akan diuji hendaknya memiliki luas minimum 2.500 mm². Kualitas kekuatan mekanis sampel harus jaga dengan mengikat erat menggunakan kawat atau pita dan dibiarkan dalam posisi tersebut sampai sebelum pengujian;
- b. sampel yang tidak dibungkus langsung untuk diuji hendaknya diberi lapisan kedap air, diberi label dan dikemas agar tidak rusak sewaktu dipindahkan ke laboratorium. Misalnya, sampel yang mudah pecah membutuhkan perawatan khusus dalam busa poliuretan (Stimpson dkk, 1927);
- c. lapisan pelindung kecuali kawat baja dilepas dan sampel tersebut dipasang pada salah satu cetakan (*housing*) sehingga bidang lemah yang akan diuji aman dalam posisi dan orientasi yang tepat. Bahan pemampatan dituang dan diatur sedemikian rupa sehingga setidaknya terdapat jarak antara bidang lemah dengan bahan pempapat sebesar 5 mm;



Gambar 2.12 Dimensi untuk pengujian kuat geser skala laboratorium (ISRM, 1974)

- d. beban normal dinaikkan sesuai dengan nilai yang telah ditentukan untuk pengujian dengan mencatat perpindahan sebagai fungsi dari waktu dan beban yang diberikan;
- e. tahap pembebanan dapat dianggap selesai ketika tingkat perubahan perpindahan normal kurang dari 0.05 mm dalam 10 menit. kemudian pembebanan geser dapat diberikan;
- f. gaya geser dapat diberikan secara bertahap tetapi biasanya diberikan secara terus-menerus agar dapat mengendalikan perpindahan;
- g. tingkat perpindahan harus kurang dari $0,1$ mm/menit dalam periode 10 menit sebelum mengambil set lain. perpindahan ini mungkin dapat meningkat tapi tidak lebih dari $0,5$ mm/menit hingga mencapai nilai puncak;
- h. setelah mencapai kekuatan puncak, pembacaan harus dilakukan berdasarkan kenaikan perpindahan dari $0,5$ sampai 5 mm sebagaimana yang diperlukan untuk menentukan kurva perpindahan gaya;
- i. ada kemungkinan untuk menentukan nilai kekuatan residual ketika sampel digeser pada tekanan normal yang konstan dan setidaknya empat rangkaian

pembacaan berturut-turut yang menunjukkan tidak lebih dari 5% variasi dalam tegangan geser atas pergeseran sepanjang 1 cm.

Pergeseran pada bidang lateral dibaca untuk mengevaluasi perilaku sampel batuan selama tes. Tegangan normal dan tegangan geser dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\text{Tegangan normal } (\sigma_n) = \frac{F_n}{A} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\text{Tegangan geser } (\tau) = \frac{F_s}{A} \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan:

σ_n = Tegangan normal (MPa)

τ = Tegangan geser (MPa)

F_n = Gaya normal (N)

F_s = Gaya geser (N)

A = Luas permukaan bidang geser (mm²)

2.2 Fraktur pada Batuan

Ahli geologis telah mengilustrasikan parameter kekuatan geser untuk lima kondisi (Gambar 2.13) yang berkisar dari fraktur berkekuatan rendah dengan *joint* yang terisi oleh mineral hingga batuan dengan kekuatan relatif tinggi yang memiliki fraktur. Kelima kondisi ini dapat dijelaskan sebagai berikut (Wyllie and Norrish, 1996);

A. Fraktur yang terisi (*infilled fracture*)

Jika material pengisi adalah material lempung dan terdapat bidang lemah pada lempungnya maka sudut gesek dalam (ϕ) cenderung rendah, tetapi ada beberapa kemungkinan kohesi sedikit lebih besar jika material pengisi tidak terganggu atau jika material pengisi adalah kalsit yang kuat misalnya kalsit tersebut mengikat erat dinding bidang lemah kekuatan kohesif mungkin signifikan.

B. Fraktur halus (*smooth fracture*)

Fraktur yang halus memiliki nilai kohesi nol, dan sudut geseknya adalah dari permukaan gesek batuan. Sudut gesekan batuan berkaitan erat dengan ukuran butir dan umumnya bernilai rendah pada batuan berbutir halus dan bernilai lebih tinggi pada batuan berbutir kasar.

C. Fraktur kasar (*rough fracture*)

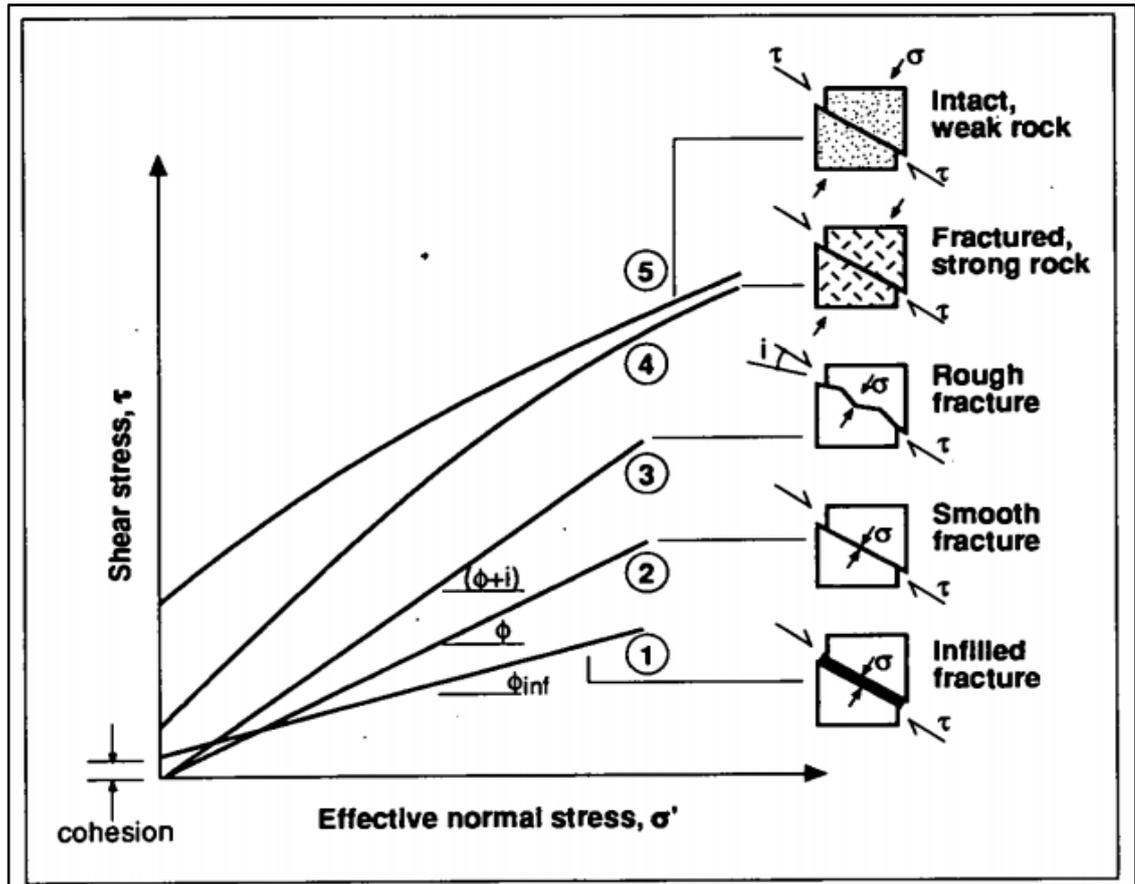
Permukaan pada batuan yang berfraktur kasar memiliki kohesi nol dan sudut gesek terdiri dari sudut gesekan material-batuan (i) yang terkait dengan kekasaran permukaan, dan rasio antara kekuatan batuan dan tegangan normal. Dengan meningkatnya tegangan normal maka asperitas semakin berkurang dan sudut gesekan total juga berkurang

D. Fraktur massa batuan (*fractured rock mass*)

Kekuatan geser dari massa batuan dengan bidang yang memiliki *joint* terletak pada bidang yang patah dan sebagian melewati batuan yang utuh dapat dinyatakan dalam kurva selubung keruntuhan. Pada tegangan normal rendah di mana ada sedikit penahan dari batuan yang retak dan fragmen yang dapat bergerak, kohesi bernilai rendah tetapi sudut gesekan tinggi karena permukaan geser relatif kasar. Pada tegangan normal yang lebih tinggi, penghancuran fragmen batuan mulai terjadi sehingga sudut gesekan berkurang.

E. Batuan utuh lemah (*weak intact rock*)

Batuan seperti tufa terdiri dari material berbutir halus yang memiliki sudut gesek rendah. Namun karena tidak mengandung fraktur maka nilai kohesi dapat menjadi lebih tinggi dari pada batuan yang kuat tapi memiliki *joint* yang relatif rapat.



Gambar 2.13 Hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal pada permukaan pecah untuk lima kondisi geologi yang berbeda (Wyllie dan Norrish, 1996)

Tujuan dilakukannya pengujian kuat geser pada bidang lemah (Hencher, 2014);

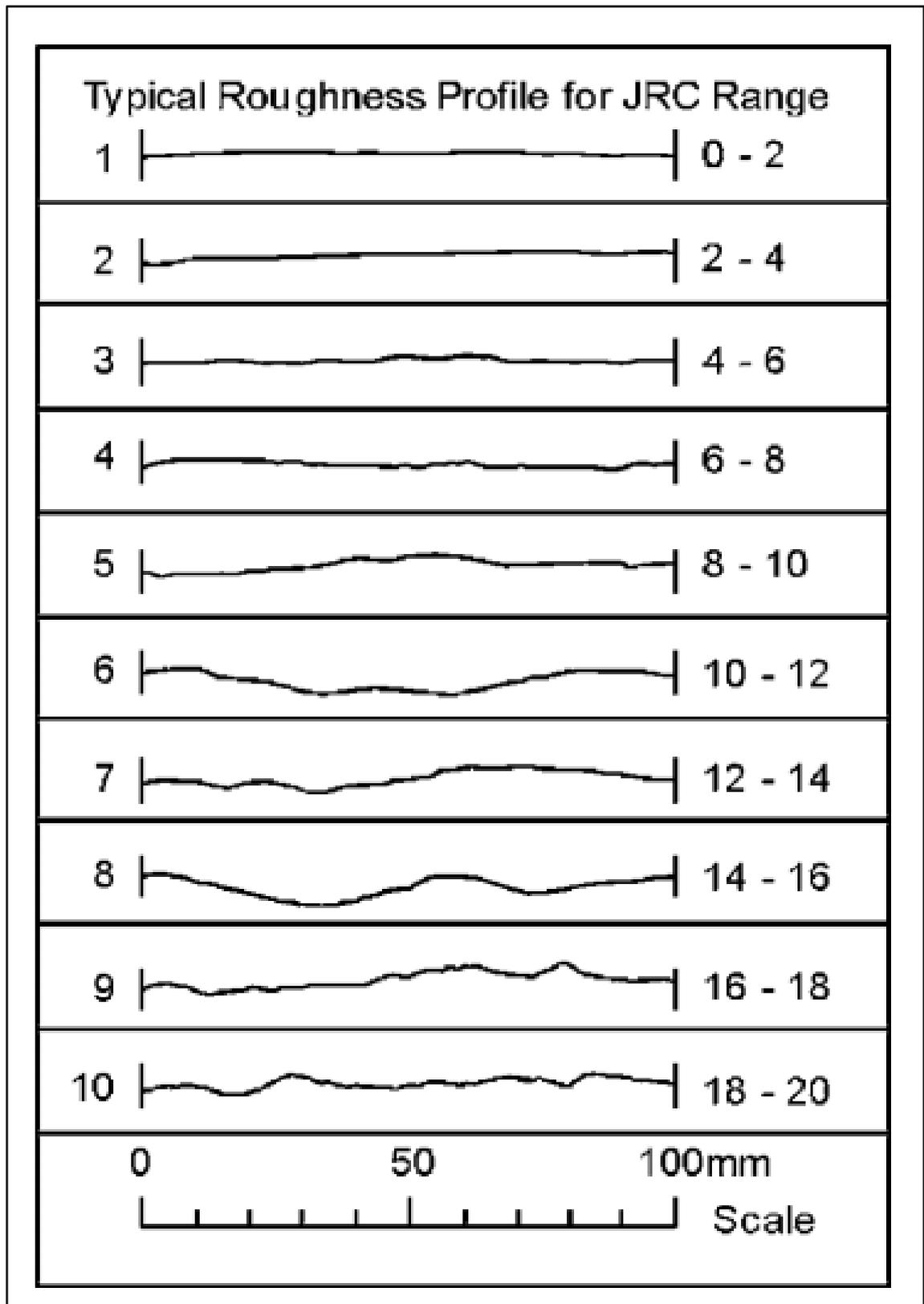
1. Penentuan sudut gesekan dasar untuk diskontinuitas yang bertekstur dan dilapisi secara alami.
2. Identifikasi fitur permukaan seperti mineralogi dan tingkat pemolesan yang memengaruhi kekuatan geser pada rentang tegangan normal yang berlaku.
3. Pengamatan kerusakan asperitas minor selama uji geser pada tingkat tegangan tertentu sehingga memungkinkan penilaian fitur kekasaran yang memungkinkan dalam desain.

2.3 *Joint Roughness Coefficient (JRC)*

Kekasaran adalah ukuran dari ketidakrataan permukaan yang melekat seperti amplitudo bidang diskontinuitas relatif terhadap bidang. Kekasaran dari bidang diskontinuitas memiliki potensi untuk mempengaruhi kekuatan geser terutama dalam hal blok yang saling terkait (Brady dan Brown, 2005). Perbedaan mekanis antara bidang lemah yang saling kontak dan tidak berkontak biasanya menghasilkan kekuatan geser dan karakteristik deformasi yang sangat berbeda. Untuk kekar yang tidak terisi, kekasaran dan kekuatan tekan dari dinding kekar akan sangat mempengaruhi sedangkan pada kekar yang terisi, sifat fisik dan mineral dari material pengisi yang memisahkan dinding kekar merupakan perhatian utama.

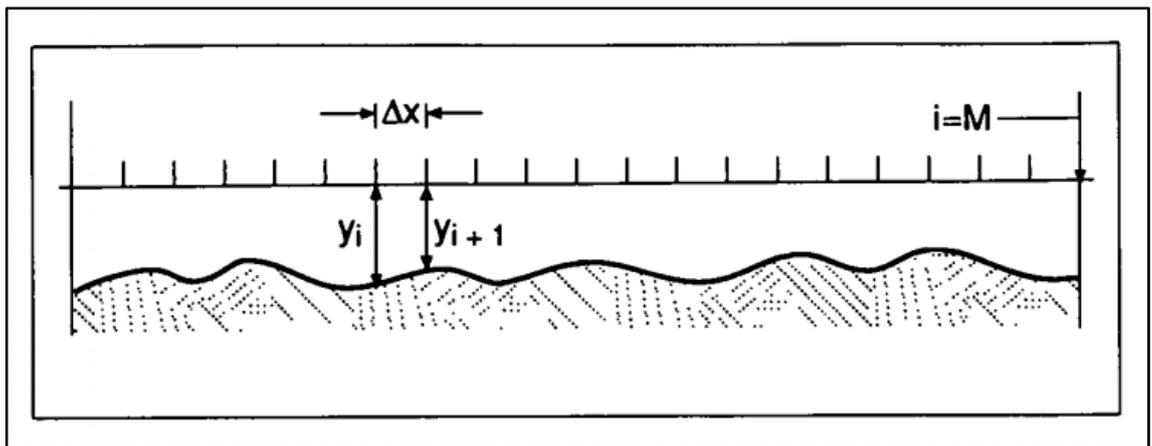
Pengukuran langsung dari sudut kekasaran dapat dilakukan di lapangan dengan mengukur variasi dalam orientasi permukaan fraktur (Feckers dan Rengers, 1971; Wyllie, 1992). Prosedur ini terdiri dari pengukuran dalam arah geser, orientasi permukaan dengan panjang dasar yang bervariasi. Untuk dimensi sampel uji kecil (pendek) maka akan ada variasi yang cukup besar dalam sudut kekasaran yang mewakili permukaan kasar, sedangkan untuk dimensi sampel uji yang lebih panjang maka variasi sudut kekasaran akan berkurang sehingga hasil pengukuran cenderung sama dengan orientasi rata-rata permukaan.

JRC pada skala laboratorium (JRC_0) dapat diperoleh dengan mencocokkan secara visual profil kekasaran aktual dengan sekumpulan profil standar yang diusulkan oleh Barton dan Choubey (1977), nilai JRC yang disarankan untuk sepuluh jenis profil kekasaran sambungan (Gambar 2.14). Sampel yang saling berpotongan dengan sudut yang bervariasi dari 0° hingga 90° ke sumbu. Sampel dapat bervariasi dari satu meter atau lebih panjang (tergantung pada panjang inti) hingga 100 mm (diameter inti). Sebagian besar sampel diperkirakan memiliki panjang 100–300 mm.



Gambar 2.14 Profil visual standar untuk mengestimasi JRC (Barton and Choubey, 1977; Gravanish, 2019)

Nilai JRC dapat diperkirakan dengan inspeksi visual dari fraktur dan perbandingan dengan profil standar dari nilai JRC yang diketahui. Namun perbandingan visual dengan profil standar agak subjektif dan rawan kesalahan. Tse dan Cruden (1979) menggambarkan suatu metode menggunakan profilometer mekanik, dan Mearz dkk. (1990) mengembangkan profil meter bayangan yang merekam bentuk permukaan dengan menggunakan kamera.



Gambar 2.15 Perkiraan nilai JRC berdasarkan amplitudo kekasaran (Barton, 1982)

Metode yang dikembangkan oleh Tse dan Cruden (1979) ditunjukkan pada Gambar 2.15. Profil ditentukan dengan mengukur jarak (y_i) permukaan bidang dari garis referensi pada interval yang sama dengan perimeter nilai Δx sepanjang interval M . Dari pengukuran ini koefisien Z_2 didefinisikan sebagai;

$$Z_2 = \left(\frac{1}{M(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right)^{1/2} \dots \dots \dots (2.18)$$

Koefisien Z_2 kemudian digunakan untuk menghitung JRC dari permukaan fraktur menggunakan persamaan regresi berikut;

$$JRC = 32,77 + 67,99 \log(Z_2), R^2 = 0,904 \dots \dots \dots (2.19)$$

Barton and Choubey (1977) dalam artikel yang ditulis oleh Gravanish (2019) membuat persamaan regresi lain untuk mengestimasi nilai JRC;

$$JRC = 34,90 + 48,70 \log(Z_2), R^2 = 0,933 \dots \dots \dots (2.20)$$

2.4 Metode Elemen Hingga

Dalam masalah keteknikan, ada beberapa hal mendasar yang tidak diketahui seperti perpindahan dalam mekanika padat, kecepatan dalam mekanika fluida, potensial listrik dan magnet dalam teknik kelistrikan dan suhu dalam masalah aliran panas.

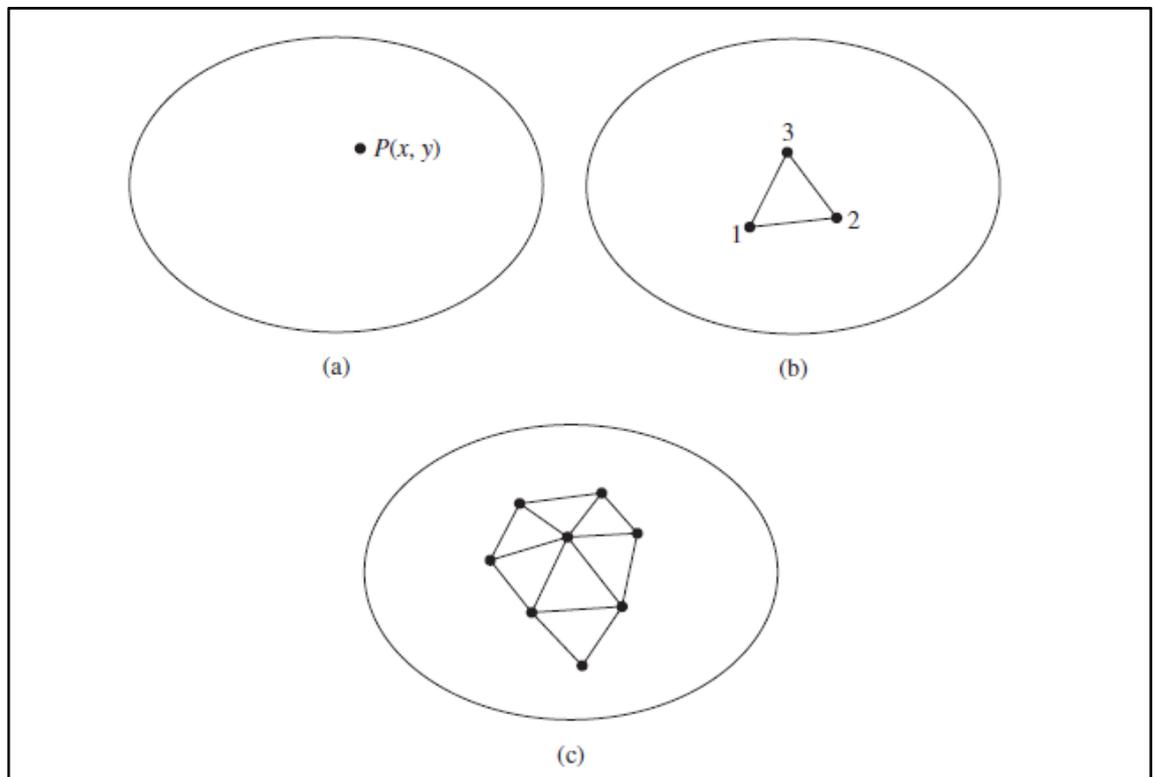
Metode elemen hingga dapat mengurangi hal-hal yang tidak diketahui tersebut menjadi bilangan hingga dengan membagi wilayah solusi menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen dan menginterpolasikan setiap variabel yang tidak diketahui pada setiap elemen. Fungsi aproksimasi didefinisikan dalam istilah variabel bidang dari titik tertentu yang disebut titik atau node. Jadi dalam analisis elemen hingga yang tidak diketahui adalah variabel hasil dari titik-titik node. Setelah ini diketahui, variabel bidang di titik lain dapat ditentukan dengan menggunakan fungsi interpolasi. Langkah selanjutnya dalam analisis elemen hingga adalah merakit properti elemen untuk setiap elemen. Sebagai contoh, dalam mekanika padat, kita harus mencari perpindahan gaya, yaitu karakteristik kekakuan dari masing-masing elemen (Bhavikatti, 2005). Persamaan sistematisnya sebagai berikut.

$$[k]_e \times \{\delta\}_e = \{F\}_e \dots\dots\dots (2.22)$$

Di mana $[k]_e$ adalah matriks kekakuan elemen, $\{\delta\}_e$ adalah vektor perpindahan node elemen dan $\{F\}_e$ adalah vektor gaya nodal. Elemen kekakuan matriks (k_{ij}) merepresentasikan gaya dalam arah koordinat 'i' akibat perpindahan satuan pada arah koordinat 'j'.

Metode elemen hingga berbasis perpindahan dapat dianggap sebagai perluasan dari metode perpindahan untuk analisis struktur balok dan rangka. Langkah-langkah dasar dalam analisis struktur balok dan rangka dengan metode perpindahan adalah sebagai berikut (Bathe, 2016).

1. Mengidealkan struktur total sebagai kumpulan elemen balok dan rangka yang saling berhubungan pada sambungan struktural.
2. Identifikasi perpindahan elemen yang tidak diketahui yang secara lengkap untuk menentukan respon perpindahan dari struktur.
3. Merumuskan persamaan keseimbangan gaya yang sesuai dengan perpindahan elemen yang tidak diketahui dan diselesaikan.
4. Setelah perpindahan ujung elemen balok dan rangka diketahui, hitung distribusi tegangan elemen internal.
5. Menginterpretasikan perpindahan dan tegangan yang diprediksi berdasarkan asumsi yang digunakan.



Gambar 2.16 Node dan elemen analisis 2D (Bathe, 2016)

2.5 Analisis Regresi Linear

Analisis Regresi merupakan suatu cara untuk menggambarkan hubungan antara dua atau lebih variabel dan menaksir nilai variabel dependen berdasar pada nilai tertentu pada nilai variabel independennya. Pada persamaan tersebut, variabel dependen adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel lain. Sedangkan variabel independen adalah variabel yang nilainya tidak tergantung dari variabel lain.

Prinsip dasar yang harus dipenuhi dalam membangun suatu persamaan regresi adalah bahwa antara variabel dependen dengan variabel independen mempunyai sifat hubungan sebab akibat, baik yang didasarkan pada teori, hasil penelitian sebelumnya, ataupun yang didasarkan pada penjelasan logis tertentu. Penelaahan terhadap prinsip dasar yang telah diuraikan sangat penting dilakukan sebelum membangun suatu persamaan regresi. Kadang-kadang hal ini sangat dilupakan, sehingga persamaan regresi yang diperoleh juga tidak ada manfaatnya.

2.5.1 Koefisien Korelasi

Conover (1978) di dalam Hidayah (2011) menjelaskan "koefisien korelasi adalah koefisien yang menggambarkan tingkat keeratan hubungan linear antara dua variabel atau lebih". Misalnya sampel acak berpasangan berukuran n yaitu $(X_1, Y_1); (X_2, Y_2); \dots; (X_n, Y_n)$, maka ukuran korelasi atau koefisien korelasi (R) antara variabel X dan variabel Y berada dalam interval $-1 < R < 1$.

1. Jika nilai R mendekati atau sama dengan 1 maka hubungan dari kedua variabel tersebut positif yang artinya semakin besar nilai X maka semakin besar pula nilai Y .
2. Jika nilai R mendekati atau sama dengan -1 maka hubungan dari kedua variabel tersebut negatif yang artinya semakin besar nilai X maka semakin kecil nilai Y .

3. Jika nilai R mendekati atau sama dengan nilai 0 maka kedua variabel tidak memiliki korelasi sehingga kenaikan nilai X tidak akan memengaruhi besarnya nilai Y.

2.5.2 Koefisien Determinasi

Koefisien determinasi (R^2) merupakan nilai yang menunjukkan tingkat keseragaman total variabel terikat yang dapat diterangkan oleh keseragaman variabel bebas. Hasil interpretasi nilai koefisien determinasi menurut Ndruru, dkk. (2014) dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hasil interpretasi nilai koefisien determinasi (Ndruru, dkk., 2014)

Nilai koefisien determinasi (R^2)	Interpretasi
0,000—0,199	Sangat rendah
0,200—0,399	Rendah
0,400—0,599	Cukup kuat
0,600—0,799	Kuat
0,800—1,000	Sangat kuat