

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH KADAR AIR TERHADAP NILAI INDEKS
KEKERASAN *SCHMIDT HAMMER* DAN KUAT TEKAN
UNIAKSIAL PADA BASAL**

Disusun dan diajukan oleh

DODI DEWANTARA

D111171313



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH KADAR AIR TERHADAP NILAI INDEKS
KEKERASAN *SCHMIDT HAMMER* DAN KUAT TEKAN
UNIAKSIAL PADA BASAL**

Disusun dan diajukan oleh

DODI DEWANTARA

D111171313

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 4 Oktober 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

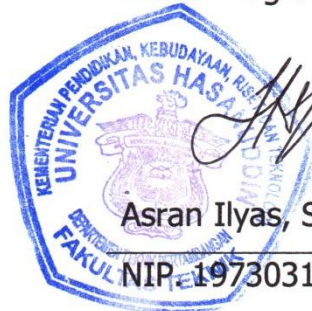
Pembimbing Utama,



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

NIP. 197111282005011002

Ketua Program Studi,



Asran Ilyas, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197303142000121001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : DODI DEWANTARA
NIM : D111171313
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Pengaruh Kadar Air Terhadap Nilai Indeks Kekerasan Schmidt Hammer dan Kuat Tekan Uniaksial pada Basal

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, Oktober 2022

Yang menyatakan



DODI DEWANTARA

ABSTRAK

Kuat tekan batuan merupakan salah satu sifat mekanis batuan yang sangat penting dalam melakukan analisis mengenai masalah geoteknik. Kuat tekan batuan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah kadar air. Tingginya kadar air pada batuan berdampak pada melemahnya kekuatan batuan. Penentuan kuat tekan batuan selama ini umumnya menggunakan uji kuat tekan uniaksial (UCS) yang memiliki akurasi yang sangat baik namun membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang mahal. Metode lain yang dapat digunakan adalah pengujian *Schmidt hammer*, namun memiliki akurasi yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi kuat tekan basal melalui pendekatan matematis berdasarkan pengaruh kadar air terhadap nilai indeks kekerasan *Schmidt hammer* dan nilai kuat tekan uniaksial. Pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah uji indeks kekerasan permukaan batuan, uji sifat fisik, uji UCS, dan analisis regresi linear, serta validasi data dengan menggunakan metode statistik. Berdasarkan analisis regresi linear didapatkan hubungan antara kadar air, indeks kekerasan *Schmidt hammer*, dan UCS adalah $UCS = 88,636 + 0,3275SCH - 43,95w$ dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,99 dan koefisien korelasi sebesar 0,99. Untuk mengontrol kinerja persamaan matematis yang diusulkan, diperlukan validasi data dengan metode statistik berupa *absolute average relative error percentage* (AAREP), *root mean square error* (RMSE), dan *variance accounted for* (VAF). Nilai AAREP, RMSE dan VAF masing-masing adalah 0,92, 0,85, dan 99,90 yang membuktikan bahwa persamaan matematis yang diperoleh dapat diterima.

Kata kunci: Kadar air, *Schmidt hammer*, kuat tekan uniaksial, basal, regresi linear, validasi metode statistik.

ABSTRACT

Compressive strength of rock is one of the mechanical properties of rock which is very important in analyzing geotechnical problems. The compressive strength of rocks can be influenced by several factors, one of which is water content. The high water content in rocks has an impact on the weakening of rock strength. The determination of the compressive strength of rocks so far generally uses the uniaxial compressive strength test (UCS) which has very good accuracy but takes a long time and is expensive. Another method that can be used is the Schmidt hammer test, but has a low accuracy. This study aims to predict the compressive strength of basalt rock through a mathematical approach based on the effect of water content on the value of the Schmidt hammer hardness index and the value of uniaxial compressive strength. The tests used in this study were the rock surface hardness index test, physical properties test, UCS test, and linear regression analysis, as well as data validation using statistical methods. Based on linear regression analysis, the relationship between moisture content, Schmidt hammer hardness index, and UCS was $UCS=88.636+0.3275SCH-43.95w$ with a coefficient of determination of 0.99 and a correlation coefficient of 0.99. To control the performance of the proposed mathematical equation, it is necessary to validate the data using statistical methods in the form of absolute average relative error percentage (AAREP), root mean square error (RMSE), and variance accounted for (VAF). The values of AAREP, RMSE and VAF are 0.92, 0.85, and 99.90, respectively, which proves that the obtained mathematical equations are acceptable.

Keywords: Moisture content, Schmidt hammer, uniaxial compressive strength, basal, linear regression, statistical method validation.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul Pengaruh Kadar Air terhadap Nilai Indeks Kekerasan *Schmidt Hammer* dan Kuat Tekan Uniaksial pada Basal 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.

Laporan Tugas Akhir ini membahas mengenai pengaruh peningkatan kadar air pada batuan terhadap nilai indeks kekerasan dengan menggunakan *Schmidt hammer* dan nilai kuat tekan uniaksial. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

Terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama 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 Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., 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 laporan 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 Ismail Ibrahim dan Ibu Masita selaku orang tua penulis yang senantiasa mendoakan, memotivasi, serta mendukung penulis dalam kondisi apapun.

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

Makassar, Oktober 2022



DODI DEWANTARA

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR PERSAMAAN.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
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 Sampel.....	5
1.6 Tahapan Penelitian	5
BAB II PENGARUH KADAR AIR TERHADAP KEKUATAN BATUAN	9
2.1 Basal	9
2.2 Sifat Fisik Batuan	11
2.3 Sifat Mekanis Batuan.....	15
2.4 Kadar Air Batuan.....	35
2.5 Analisis Regresi Linier dan Validasi Data	41
BAB III METODE PENELITIAN.....	45
3.1 Studi Literatur	45

	Halaman
3.2 Pengambilan Data Lapangan dan Pengambilan Sampel.....	45
3.3 Pengambilan Data Laboratorium.....	49
3.4 Uji Laboratorium dengan Berbagai Kondisi Kadar Air	59
3.5 Analisis Data	60
 BAB IV PENGARUH KADAR AIR TERHADAP INDEKS KEKERASAN <i>SCHMIDT</i>	
<i>HAMMER</i> DAN KUAT TEKAN UNIAKSIAL	62
4.1 Data Pengujian Lapangan	62
4.2 Data Pengujian Laboratorium.....	65
4.3 Analisis Pengaruh Kadar Air terhadap Nilai Indeks Kekerasan <i>Schmidt</i> <i>Hammer</i> dan Nilai Kuat Tekan Uniaksial	76
4.4 Validasi Data	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	82
5.1 Kesimpulan	82
5.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1	Ilustrasi kondisi batuan; (a) Kondisi batuan alami; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) Kondisi batuan kering 12
2.2	Pengujian <i>Schmidt hammer</i> (Nazir <i>et al.</i> , 2013)..... 17
2.3	Jenis <i>Schmidt hammer</i> (Aydin dan Basu, 2005)..... 18
2.4	Prinsip kerja <i>Schmidt hammer</i> (Aydin, 2008) 20
2.5	(a) Perubahan dimensi dan arah deformasi pada sampel batuan uji kuat tekan uniaksial (Thuro, 2001); (b) Pola distribusi gaya uniaksial pada berbagai dimensi sampel batuan (Kim dan Yi, 2002) 23
2.6	Grafik perbedaan keruntuhan batuan yang bersifat brittle dan duktil (Hudson dan Harrison, 1997)..... 24
2.7	Tipe keruntuhan pada batuan 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)..... 25
2.8	Kurva tegangan-regangan uji kuat tekan uniaksial (Rai dkk., 2014) 26
2.9	(a) Kurva modulus sekan; (b) Kurva modulus tangen; (c) Kurva modulus rata-rata (ISRM, 1979)..... 28
2.10	Korelasi antara <i>Schmidt hammer</i> dan UCS (Nazir <i>et al.</i> , 2013)..... 31
2.11	Korelasi antara <i>Schmidt hammer</i> dan UCS (Aydin dan Basu, 2005) 32
2.12	Korelasi antara <i>Schmidt hammer</i> dan UCS (Saptono <i>et al.</i> , 2013) 33
2.13	Korelasi antara <i>Schmidt hammer</i> dan UCS (Yilmaz and Sendir, 2002).... 34
2.14	Korelasi antara <i>Schmidt hammer</i> dan UCS (Katz <i>et al.</i> , 2009)..... 34
2.15	Korelasi antara <i>Schmidt hammer</i> dan UCS (Qaidahiyani <i>et al.</i> , 2021) 35
2.16	Komposisi batuan secara umum (Lashkaripour dan Ajalloeian, 2015) 36

Gambar	Halaman
3.1 Lokasi pengambilan sampel berdasarkan kondisi air tanah pada klasifikasi RMR: (a) Kondisi natural kering; (b) Kondisi natural lembab; (c) Kondisi natural basah	46
3.2 (a) Pengujian indeks kekerasan dengan menggunakan <i>Schmidt hammer</i> pada basal; (b) Pengambilan sampel batuan	47
3.3 Peralatan uji indeks kekerasan permukaan batuan: (a) <i>Schmidt hammer</i> tipe N; (b) Amplas; (c) Sampel batuan uji	47
3.4 Peralatan preparasi sampel: (a) Alat ukur; (b) Alat bor; (c) Alat pemotong batuan	49
3.5 Proses preparasi sampel: (a) Pengeboran bongkahan batuan; (b) Pemotongan sampel uji kuat tekan	50
3.6 Peralatan uji sifat fisik batuan: (a) Neraca Ohaus; (b) Sampel batuan; (c) Wadah berisi air; (d) Timbangan digital; (e) Desikator; (f) Pompa vakum; (g) Tali; (h) Oven.....	51
3.7 Penimbangan berat natural sampel.....	52
3.8 Perendaman sampel batuan uji sifat fisik.....	53
3.9 Proses penimbangan berat gantung sampel	54
3.10 Proses pengeringan sampel batuan dalam oven.....	54
3.11 Peralatan uji kuat tekan uniaksial batuan: (a) Jangka sorong; (b) Kacamata <i>safety</i> ; (c) <i>Hydraulic compressor machine</i> ; (d) <i>Dial gauge</i> ; (e) Sepatu <i>safety</i>	56
3.12 Pengukuran dimensi sampel batuan uji kuat tekan uniaksial: (a) Pengukuran tinggi batuan uji; (b) Pengukuran diameter batuan uji.....	56
3.13 Pemasangan <i>dial gauge</i> pada <i>hydraulic compressor machine</i>	57
3.14 Kondisi batuan setelah pengujian	58

Gambar	Halaman
3.15	Kondisi sampel pengujian laboratorium 59
3.16	Diagram alir penelitian 61
4.1	Grafik hubungan kadar air batuan (%) dengan nilai indeks kekerasan permukaan (MPa) 64
4.2	Grafik hubungan kadar air batuan (%) dengan kuat tekan uniaksial (MPa) 71
4.3	Grafik hubungan kadar air batuan (%) dengan modulus Young (MPa) .. 73
4.4	Grafik hubungan kadar air batuan (%) dengan nisbah Poisson 75
4.5	Grafik hubungan kadar air batuan terhadap indeks kekerasan <i>Schmidt hammer</i> dan kuat tekan uniaksial 76
4.6	Grafik hubungan kadar air batuan terhadap indeks kekerasan <i>Schmidt hammer</i> dan kuat tekan uniaksial pada kondisi kering 78
4.7	Grafik hubungan kadar air batuan terhadap indeks kekerasan <i>Schmidt hammer</i> dan kuat tekan uniaksial pada kondisi lembab 79
4.8	Grafik hubungan kadar air batuan terhadap indeks kekerasan <i>Schmidt hammer</i> dan kuat tekan uniaksial pada kondisi basah 80

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2.1	Kategori nisbah Poisson (Belyadi, 2019).....	30
2.2	Pengaruh saturasi dalam kuat tekan uniaksial (Agustiwijaya, 2007)	39
2.3	Pengaruh kandungan air terhadap kuat tekan pada batuan beku basal (Verma <i>et al.</i> , 2014)	40
2.4	Nilai rata-rata kuat tekan batuan kondisi kering dan jenuh air (Sachpasiz, 2004)	41
2.5	Tingkat keeratan hubungan dua variabel berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sugyono, 2018).....	43
4.1	Hasil perhitungan nilai indeks kekerasan <i>Schmidt hammer</i>	63
4.2	Densitas sampel batuan uji	65
4.3	Nilai derajat kejenuhan, porositas, dan nisbah pori sampel batuan uji ...	67
4.4	Nilai kadar air pada batuan	69
4.5	Hasil pengolahan data uji kuat tekan uniaksial batuan	70

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan	Halaman
2.1 Bobot isi natural	13
2.2 Bobot isi jenuh	13
2.3 Bobot isi kering.....	13
2.4 Berat jenis asli.....	13
2.5 Berat jenis semu.....	14
2.6 Kadar air asli	14
2.7 Kadar air jenuh.....	14
2.8 Derajat kejenuhan	15
2.9 Porositas.....	15
2.10 Nisbah pori	15
2.11 Kuat tekan uniaksial.....	26
2.12 Perbandingan diameter dan tinggi sampel menurut ASTM.....	27
2.13 Perbandingan diameter dan tinggi sampel menurut Protodyakonov.....	27
2.14 Modulus Young.....	27
2.15 Nisbah Poisson	29
2.16 Kandungan air pada material	37
2.17 Persamaan regresi	42
2.18 Koefisien regresi	42
2.19 Konstanta regresi.....	42
2.20 Koefisien korelasi	42
2.21 AAREP	43
2.22 RMSE	43
2.23 VAF.....	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A. PETA LOKASI PENGAMBILAN SAMPEL.....	89
B. LEMBAR DESKRIPSI MAKROSKOPIS BATUAN.....	91
C. HASIL UJI INDEKS KEKERASAN <i>SCHMIDT HAMMER</i>	93
D. PERHITUNGAN SIFAT FISIK BATUAN.....	95
E. HASIL UJI KUAT TEKAN UNIAKSIAL.....	112
F. HASIL ANALISIS REGRESI LINEAR.....	145
G. VALIDASI DATA.....	152

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Basal termasuk batuan beku yang keterdapatannya tersebar hampir di seluruh Indonesia yaitu pulau Jawa, Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi menurut peta geologi Indonesia. Khususnya di Sulawesi keterdapatan basal dapat berupa intrusi pada ofiolit. Intrusi merupakan batuan beku yang telah menjadi kristal dari sebuah magma yang meleleh di bawah tanah sebelum mencapai permukaan bumi, sedangkan ofiolit merupakan penggalan kerak samudera dan lapisan mantel atas yang telah terangkat (terpindahkan) dan tersingkap di bagian tepi kerak benua. Kabupaten Gowa merupakan salah satu daerah di Sulawesi dengan potensi basal yang melimpah, yakni mencapai lebih dari 100 juta ton bahan galian basal (Best, 1982).

Daerah penelitian, yang terletak di Kecamatan Pattallassang, Kabupaten Gowa terdapat tambang basal yang dikelola oleh masyarakat sekitar. Basal pada daerah ini memiliki struktur yang keras dan masif. Berdasarkan sifat mekanisnya yang keras, basal banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang konstruksi bangunan seperti sebagai batu pondasi rumah, jembatan, jalan, maupun dijadikan sebagai ornamen penghias pada bangunan. Menurut Attewell *and* Farmer (1976) kekuatan basal (UCS) dalam kondisi natural berkisar antara 100–300 MPa.

Kekuatan batuan adalah salah satu metode yang paling penting dan dapat diandalkan untuk mengklasifikasikan batuan dan aplikasinya untuk tujuan konstruksi. Nilai kekuatan batuan mengacu pada kemampuan material batuan untuk menahan tegangan yang diterapkan tanpa terjadi kegagalan (Xiu *et al.*, 2020). Karakterisasi kekuatan dari sampel batuan ditentukan dengan menggunakan pengujian laboratorium,

pengujian tersebut antara lain kuat tekan uniaksial dan terkungkung (*uniaxial and confined compression tests*), uji geser (*shear tests*), serta uji tarik langsung dan tidak langsung (*direct and indirect tension tests*). Namun, pengujian yang paling sering digunakan untuk kekuatan batuan adalah uji kuat tekan uniaksial (Goodman, 1989).

Kuat tekan uniaksial batuan atau *uniaxial compressive strength* (UCS) merupakan salah satu parameter yang sangat penting dalam melakukan analisis mengenai masalah geoteknik seperti peledakan batuan, perancangan bendungan dan terowongan, pengeboran maupun penggalian pada batuan (Nazir *et al.*, 2013; Momeni *et al.*, 2015; Melati, 2019). Menurut Fener *et al.* (2005), kuat tekan uniaksial batuan secara luas digunakan dalam pendesainan struktur batuan yang terdapat di permukaan maupun bawah tanah. Pengujian kuat tekan uniaksial dilakukan untuk mengukur kuat tekan batuan dari sebuah contoh batuan berbentuk balok maupun silinder dalam satu arah (Leba dkk., 2020). Analisis dan pengukuran nilai kuat tekan batuan dapat dilakukan melalui pengujian di laboratorium terhadap sampel batuan yang diperoleh dari lapangan (Hakim dkk., 2016).

Nilai kuat tekan uniaksial dari percontoh batuan merupakan tegangan yang terjadi pada contoh batuan saat mengalami keruntuhan (*failure*) akibat pembebanan (Prasetya, 2013). Nilai kuat tekan uniaksial dapat digunakan untuk memilih metode pemberaian batuan pada kegiatan penambangan baik sistem tambang terbuka maupun tambang bawah tanah apakah menggunakan metode peledakan atau menggunakan alat mekanis (Gusnarkali, dkk., 2020). Selain itu, modulus Young dan nisbah Poisson yang diperoleh dari uji kuat tekan uniaksial yang merupakan masukan dasar untuk pemodelan geomekanik dan desain teknik geologi (Zhang, 2019).

Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi nilai kuat tekan batuan, salah satu diantaranya adalah kadar air (Vasarhelyi, 2005; Agustiwijaya, 2007; Siesgesmund *and* Durrast, 2011; Lashkaripour *and* Ajalloeian, 2015). Kadar air atau *moisture content*

merupakan salah satu parameter penting dalam rekayasa batuan, khususnya pada proyek yang berhubungan dengan batuan (Lashkaripour *and* Ajalloeian, 2015). Sebagian besar peneliti telah sepakat bahwa kekuatan batuan akan mengalami penurunan apabila kadar air pada batuan mengalami peningkatan (Agustiwijaya, 2007). Penurunan kekuatan batuan khususnya kuat tekan batuan akibat peningkatan kadar air memerlukan perhatian khusus terutama dalam membuat suatu desain struktur agar desain yang dibuat tetap dalam keadaan stabil (Rai, dkk., 2014).

Penentuan kuat tekan batuan selama ini banyak menggunakan uji kuat tekan batuan di laboratorium menggunakan *uniaxial compressive strength* (UCS). Uji UCS memiliki akurasi yang sangat baik, namun pelaksanaannya membutuhkan waktu yang lama dan memakan biaya yang tinggi (\pm 650.000/sampel) (Karakus, dkk., 2005). Metode lain yang dapat digunakan untuk menentukan kuat tekan batuan adalah uji secara langsung di lapangan menggunakan alat *Schmidt hammer*. Alat ini sangat sederhana, mudah dan murah untuk digunakan, namun demikian akurasi alat ini perlu menjadi pertimbangan (Kahraman *and* Kesimal, 2014). Berdasarkan hal tersebut di atas, korelasi penentuan kuat tekan batuan berdasarkan UCS dan kuat tekan batuan menggunakan *Schmidt hammer* menjadi sangat penting untuk diteliti.

Penelitian ini berfokus pada penggunaan *Schmidt hammer* untuk menentukan kuat tekan batuan dengan mempertimbangkan kondisi kadar air pada batuan. Hal ini disebabkan tingginya intensitas hujan pada daerah penelitian khususnya Kabupaten Gowa yang termasuk salah satu kabupaten di Sulawesi Selatan dengan intensitas curah hujan tinggi yakni 237,75 mm berdasarkan data intensitas curah hujan tahunan BMKG tahun 2020. Tingginya intensitas hujan pada daerah penelitian inilah dapat mengakibatkan batuan mengalami peningkatan kadar air yang berdampak pada kekuatan batuan sehingga diperlukan kajian mengenai pengaruh kadar air terhadap kuat tekan batuan menggunakan *Schmidt hammer* dan uji UCS.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian yang akan dilakukan membahas mengenai pengaruh peningkatan kadar air pada batuan yang dapat memengaruhi kekuatan batuan. Rumusan masalah proposal penelitian ini adalah:

1. Tingginya curah hujan di Kabupaten Gowa mengakibatkan peningkatan kadar air pada batuan yang memengaruhi kekuatan batuan.
2. Uji UCS memberikan hasil kekuatan batuan dengan tingkat keakuratan yang tinggi, namun pengujiannya membutuhkan waktu yang lama (± 1 hari pengujian) dan biaya yang mahal (± 650.000 /sampel). Maka dari itu, diperlukan metode pengujian yang lebih sederhana, cepat, dan hasilnya dapat diperoleh langsung di lapangan.

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis pengaruh kadar air terhadap indeks kekerasan *Schmidt hammer* dan kuat tekan uniaksial pada basal.
2. Menganalisis korelasi antara kadar air dengan *Schmidt hammer* dan nilai UCS.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai acuan dasar dalam menentukan nilai kuat tekan batuan secara akurat dan efisien dengan menggunakan *Schmidt hammer* melalui pendekatan korelasi antara uji *Schmidt hammer* dan uji UCS. Selain itu, penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi acuan dasar dalam

melakukan kegiatan rekayasa batuan seperti penggalian, peledakan, maupun pemberaian basal yang dapat dimanfaatkan sebagai material konstruksi.

1.5 Lokasi Pengambilan Sampel

Lokasi pengambilan sampel secara administratif terletak di Kecamatan Pattallassang, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Stasiun pengambilan sampel terletak pada koordinat 5°13'45" S dan 119°33'22" E. Stasiun pengambilan sampel merupakan tambang rakyat yang dimanfaatkan sebagai tambang batuan untuk konstruksi bangunan berupa batu pondasi, kerikil, dan timbunan oleh masyarakat sekitar. Untuk sampai di lokasi penelitian, diperlukan waktu perjalanan selama satu jam dari arah Kota Makassar. 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.

1.6 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahap, antara lain:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari dan mengkaji berbagai referensi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Referensi yang digunakan berasal dari buku, *e-book*, jurnal, artikel, dan sumber lain yang dapat dipertanggung jawabkan. Hasil dari kajian dan pengumpulan referensi ini akan menjadi landasan dalam melaksanakan kegiatan penelitian.

2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah merupakan kegiatan menyimpulkan masalah yang akan menjadi topik utama pembahasan dalam penelitian. Masalah yang akan diangkat

sebagai pembahasan utama pada penelitian ini adalah pengaruh kadar air terhadap nilai indeks kekerasan batuan dengan menggunakan *Schmidt hammer* dan nilai kuat tekan uniaksial pada basal.

3. Pengambilan Data Lapangan

- a. Observasi lapangan dilakukan terlebih dahulu dengan melihat kondisi sampel yang ada di lapangan berdasarkan parameter kondisi air tanah pada klasifikasi *rock mass rating* (RMR) yang akan digunakan untuk pengujian indeks kekerasan *Schmidt hammer* secara langsung di lapangan.
- b. Pengujian indeks kekerasan batuan dilakukan dengan menggunakan alat *Schmidt hammer* untuk memperoleh nilai pantul (*rebound value*) yang menandakan kekerasan permukaan batuan. Pengujian harus dilakukan dengan memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh *american society for testing and materials* (ASTM).

4. Pengambilan Sampel Batuan

Sampel yang akan digunakan sebagai sampel uji pada penelitian ini adalah basal yang diambil secara langsung di lapangan. Pengambilan sampel diawali dengan menentukan koordinat lokasi penelitian. Sampel yang diambil dalam bentuk blok batuan dalam kondisi masih segar (*fresh*). Ketebalan blok batuan yang diambil lebih dari 15 cm agar dapat dibentuk menjadi silinder.

5. Preparasi Sampel

Preparasi sampel dilakukan untuk menyiapkan sampel sebelum dilakukan pengujian. Preparasi sampel meliputi pengeboran (*coring*) sampel yang dilakukan di *Workshop* Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin, pemotongan sampel dan pengikisan permukaan sampel yang dilakukan di *Workshop* Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin. Sampel batuan yang akan diuji berbentuk silinder dengan diameter pada umumnya antara 50–

70 mm dengan tinggi dua kali diameter tersebut ($L/D=2$). Preparasi sampel berupa pengeboran dilakukan di *Workshop* Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

6. Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Geomekanika Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang terbagi menjadi beberapa pengujian yaitu:

- a. Pengujian sifat fisik dilakukan dengan mengambil sebagian kecil material kemudian dilakukan pengukuran kondisi fisik material. Pengujian sifat fisik ini akan menghasilkan nilai bobot isi, berat jenis, kadar air, derajat kejenuhan, porositas, dan nisbah pori. Pengujian harus dilakukan dengan memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh *international society for rock mechanics* (ISRM).
- b. Pengujian kuat tekan uniaksial dilakukan dengan menggunakan alat *uniaxial compressive strength*. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai kuat tekan batuan, kurva tegangan dan regangan, nilai modulus Young, dan nisbah Poisson. Pengujian harus dilakukan dengan memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh *international society for rock mechanics* (ISRM).

7. Pengolahan dan Analisis Data

Data yang telah diperoleh dari hasil pengujian di lapangan dan pengujian di laboratorium berupa uji indeks kekerasan, uji sifat fisik, dan uji kuat tekan uniaksial akan diolah dan dianalisis dengan menggunakan analisis regresi linear untuk menentukan korelasi antara uji indeks kekerasan *Schmidt hammer* dan uji kuat tekan uniaksial berdasarkan pengaruh kadar air pada batuan dalam pendekatan empiris. Persamaan empiris yang telah didapatkan nantinya akan dilakukan validasi data untuk mengetahui tingkat keakurasian pengujian dengan menggunakan metode analisis statistik berupa *absolute average relative error*

percentage (AAREP), root mean square error (RMSE), dan variance accounted for (VAF).

8. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Setelah pengumpulan dan pengolahan data selesai, tahap selanjutnya adalah penyusunan laporan akhir. Pada bagian akhir laporan ini, akan ditarik kesimpulan dari masalah-masalah yang telah dirumuskan sebelumnya berdasarkan hasil dari pengolahan data yang telah dilakukan.

9. Seminar dan Penyerahan Laporan Tugas Akhir

Laporan tugas akhir yang telah disusun kemudian dipresentasikan di depan pembimbing dan penguji dalam seminar hasil dan ujian meja. Laporan tugas akhir yang telah dipresentasikan dan telah direvisi, selanjutnya diserahkan ke perpustakaan Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

BAB II

PENGARUH KADAR AIR TERHADAP KEKUATAN BATUAN

2.1 Basal

Basal termasuk batuan beku ekstrusif yang berasal dari hasil pembekuan magma yang terjadi di permukaan bumi dengan komposisi basa. Menurut Wilson (1991) basal dapat terbentuk pada posisi tektonik konvergen, divergen, di tengah lempeng samudera, ataupun di tengah lempeng benua dengan kenampakan vulkanik dan karakteristik seri magma yang berbeda-beda. Komposisi basal terdiri atas mineral proksin, amfibol, plagioklas dan gelas vulkanik. Keberadaan gelas vulkanik hanya dimiliki oleh basal. Umumnya basal berwarna abu-abu atau hitam disebabkan karena pembekuannya yang cepat di permukaan bumi.

Basal biasanya bersifat masif dan keras, bertekstur afanitik, atau batuan beku berbutir sangat halus sehingga mineral/kristal penyusunnya tidak dapat diamati secara makroskopis. Basal sendiri bisa dibedakan menjadi dua tipe, yaitu basal alkali dan teolitik. Hal itu terjadi dikarenakan perbedaan kandungannya yaitu Na_2O dan K_2O . Basal Alkali memiliki kandungan Na_2O dan K_2O lebih tinggi daripada basal teolitik (Williams *et al.*, 1982).

Basal alkali lebih sering dijumpai di daerah kerak benua yang terangkat berbentuk kubah (*updomed continental crust*) dan kerak benua yang memiliki *rifting* (*rifted continental crust*) dan berada di pulau-pulau oseanik seperti Pulau Hawaii. Sementara basal teolitik banyak terdapat di permukaan samudera yang berbentuk sangat besar sehingga membentuk daratan tinggi dengan bagian atas yang rata disebabkan karena erosi (*plateau*). Di Indonesia *plateau* basal terdapat di Sukadana, Lampung.

Basal yang termasuk batuan beku, keterdapatannya tersebar hampir di seluruh Indonesia menurut peta geologi Indonesia. Kepulauan di Paparan Sunda berawal dari Kepulauan Anambas dan menyebar ke arah timur laut ke Natuna dan ke arah barat daya ke Kepulauan Riau dan Bangka Belitung. Di kepulauan Natuna batuan tertua terdapat batuan beku basal dan di Pulau Midai di barat daya kepulauan Natuna terdapat vulkanik basal. Kemudian di Sumatera bagian barat terdapat basal, hal itu dikarenakan Sumatera Barat tersusun atas endapan batuan tersier yang sangat tebal dan bersifat resistensi terhadap erosi kecil. Singkapan-singkapan batuan yang berumur pretersier di jalur non-vulkanik sangat jarang ditemukan, sedangkan untuk basal dapat ditemukan secara lokal. Basal juga ditemukan di Sumatera Selatan berupa lava basal dan terjadi sesar serta lava riolitik hingga ke daerah Sukada. Di Lampung terdapat *plateau* basal yang terjadi sejak zaman kuartar dan Pulau Kalimantan di sepanjang jalur utara Kalimantan Barat.

Selain terdapat di pulau-pulau di atas, basal dapat ditemukan pula di Sulawesi berupa intrusi pada ofiolit. Intrusi sendiri adalah batuan beku yang telah menjadi kristal dari sebuah magma yang meleleh di bawah tanah sebelum mereka mencapai permukaan bumi, sedangkan ofiolit merupakan penggalan kerak samudera dan lapisan mantel atas di bawahnya yang telah terangkat atau terpindahkan dan tersingkap di bagian tepi kerak benua (Best, 1982). Daerah lainnya yang terdapat basal adalah Pulau Jawa, tepatnya di daerah Kebumen, Banjarnegara, dan Wonosobo berupa situs batu rijang dan lava basal berbentuk bantal di Kali Muncar (Asikin dkk., 1992).

Sifat mekanis basal dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain komposisi mineral penyusun batuan, tingkat kejenuhan air, kondisi struktur, dan porositas batuan. Menurut Attewell and Farmer (1976) kuat tekan basal dalam kondisi natural berkisar antara 100–300 MPa. Oleh karena itu, basal yang memiliki struktur yang keras dan masif dimanfaatkan dalam berbagai bidang terutama untuk konstruksi bangunan seperti

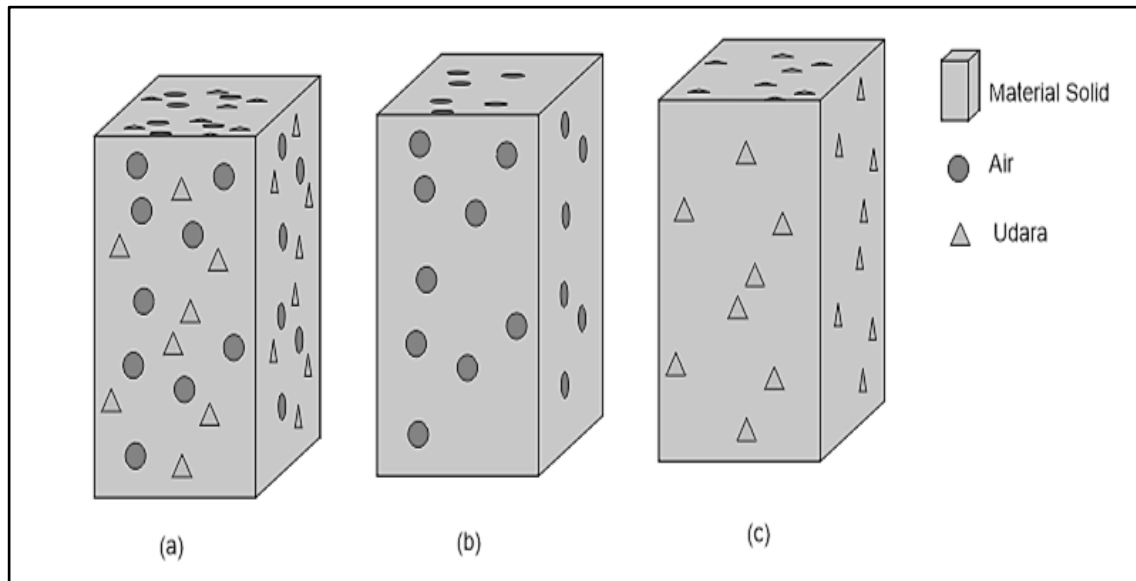
sebagai batu pondasi maupun dijadikan sebagai ornamen penghias bangunan dan rumah.

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 sampel batuan 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 ± 105 °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 pori. 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.

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

6. Nisbah pori (*void ratio*)

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

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

Keterangan:

$W_o - W_s$ = volume batuan tanpa pori

$W_w - W_s$ = volume total batuan

W_n = berat batuan natural (gram)

W_w = berat batuan jenuh (gram)

W_s = berat batuan gantung (gram)

W_o = berat batuan 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 sampel batuan di laboratorium. Sampel 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 sampel 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 sampel 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.

2.3.1 *Schmidt Hammer*

Schmidt hammer dikembangkan di akhir tahun 1940-an sebagai indeks peralatan untuk pengujian non-destruktif dari beton *insitu* (pengujian di lapangan) telah digunakan dalam praktik mekanika batuan sejak awal 1960-an, terutama untuk memperkirakan kekuatan tekan uniaksial (σ_c) dan modulus Young (E) dari material batuan. *Schmidt hammer* telah lama dan secara luas digunakan dalam menentukan kekuatan beton dan batuan sehingga ditetapkan metode standar untuk pengujian *Schmidt hammer* mungkin diharapkan untuk memastikan nilai-nilai yang konsisten, dapat dipercaya dan dapat digunakan sebagai korelasi untuk beberapa jenis batuan tertentu (Aydin dan Basu, 2005). Proses pengujian alat *Schmidt hammer* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



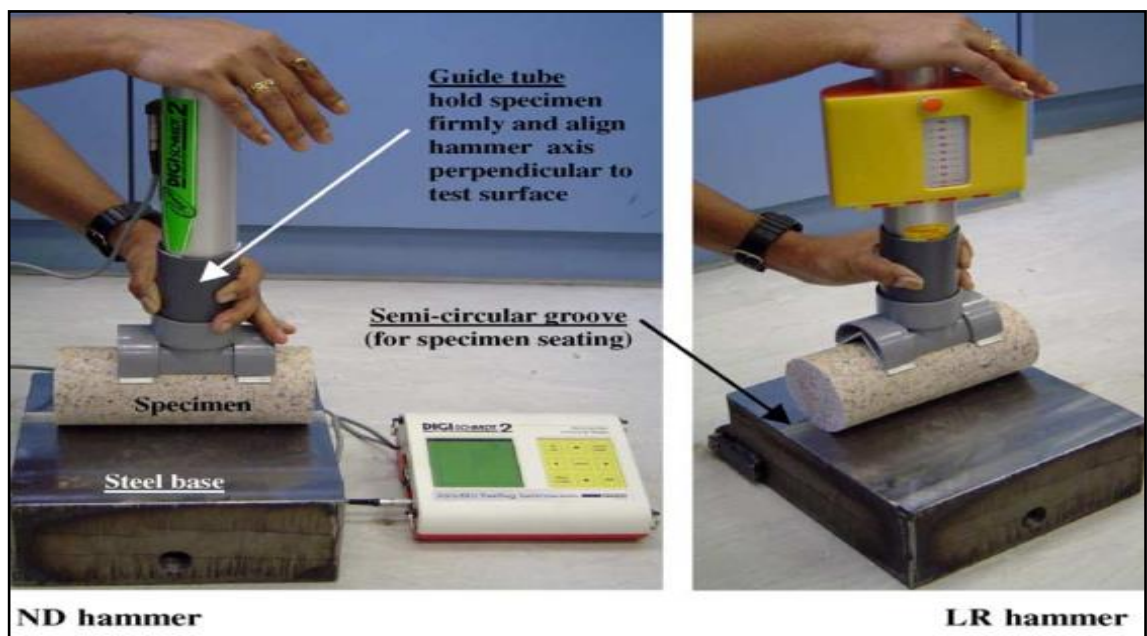
Gambar 2.2 Pengujian *Schmidt hammer* (Nazir *et al.*, 2013)

Pengujian *Schmidt hammer* atau *rebound test* adalah tes indeks sederhana untuk menentukan kekuatan permukaan sampel batuan. Pengujian ini tidak mengakibatkan terjadinya penghancuran sampel (non-destruktif) dan dapat diulang pada sampel yang sama. Nilai indeks yang diperoleh adalah nomor *rebound* (R) atau nomor pantulan yang merupakan indikator dari kekerasan permukaan sampel (Nazir *et al.*, 2013). *Schmidt hammer* memberikan pengukuran cepat dan murah dari kekerasan permukaan yang banyak digunakan untuk memperkirakan sifat mekanis material batuan. Beberapa masalah seperti jenis palu, normalisasi nilai *rebound*, dimensi batuan, kehalusan permukaan, derajat pelapukan, kadar air, proses pengujian, reduksi data, dan prosedur analisis akan memengaruhi konsistensi dan reliabilitas hasil pengujian *Schmidt hammer* (Aydin dan Basu, 2005).

a. Jenis *Schmidt hammer*

Schmidt hammer terdiri dari 2 jenis yaitu tipe L dan tipe N yang diperlihatkan pada Gambar 2.3. Jenis *Schmidt hammer* masing-masing memiliki energi dampak

yang berbeda, nilai energi dampak untuk *Schmidt hammer* jenis L adalah 0,735 Nm sedangkan palu jenis N memiliki energi dampak 2,207 Nm (Aydin, 2008). Goudie (2006) memberikan penjelasan bahwa ahli geomorfologi lebih banyak menggunakan *Schmidt hammer* jenis N. Tipe N dapat memberikan data pada berbagai jenis batuan dari lemah sampai dengan sangat kuat dengan kekuatan tekan yang berkisar dari 20–250 MPa.



Gambar 2.3 Jenis *Schmidt hammer* (Aydin dan Basu, 2005)

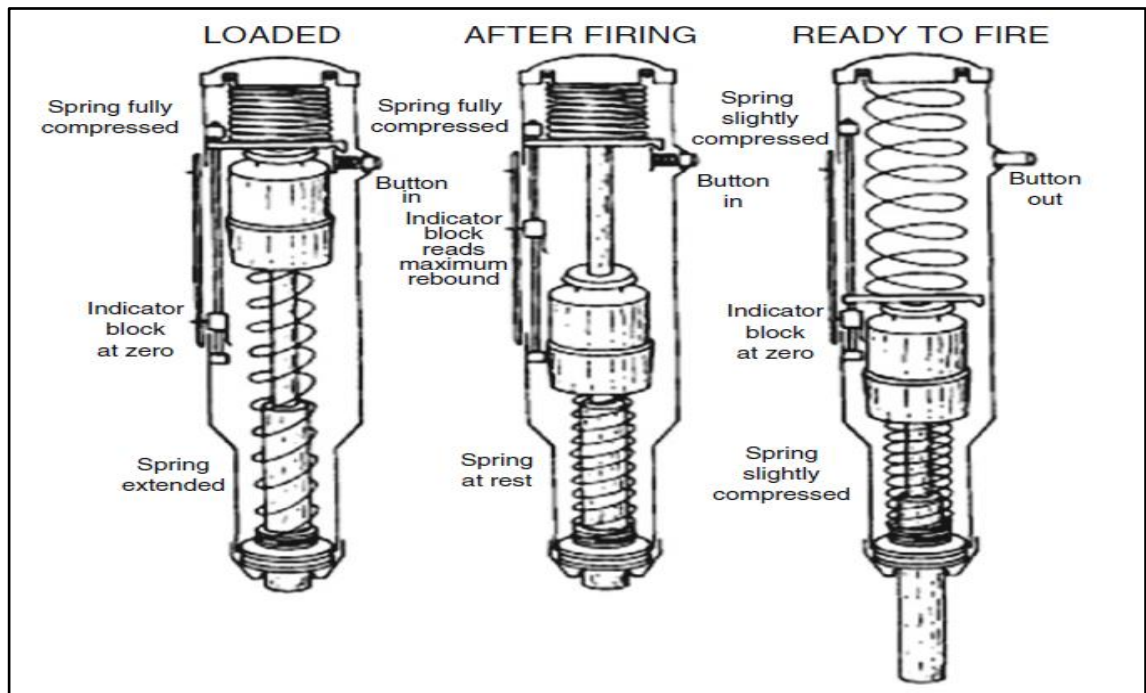
Tipe N telah tersedia dalam bentuk digital walaupun dengan harga yang lebih mahal. Jenis palu L memiliki dampak tiga kali lebih rendah dari jenis N (0,735 Nm dibandingkan dengan 2,207 Nm), hal ini sesuai untuk batuan lemah yang disertai dengan pelapukan. ISRM 1978 hanya mendukung atau memberikan standar untuk penggunaan *Schmidt hammer* tipe L untuk pengujian batuan sedangkan ASTM 2001 tidak menentukan jenis *Schmidt hammer*. Kedua jenis palu yang digunakan untuk menguji batuan dari berbagai macam kekuatan tekan uniaksial (σ_c), ISRM dan ASTM merekomendasikan berbagai perubahan nilai signifikan dari UCS yaitu 1–100 MPa (Aydin dan Basu, 2005).

b. Prinsip kerja dan standar pengukuran *Schmidt hammer*

Prinsip kerja dari *Schmidt hammer* adalah ketika (terdiri dari piston *spring loaded*) ditekan secara ortogonal terhadap permukaan yang rata, piston secara otomatis akan dilepaskan ke arah *plunger* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.4. Pelepasan piston ke arah *plunger* akan memberikan dampak berupa transfer energi ke material, sejauh mana energi ini kembali tergantung pada kekerasan (daya tahan terhadap penetrasi atau kerusakan) dari material. Nilai pantul atau *rebound number* dinyatakan sebagai persentase dari panjang bentangan maksimum dari kunci pegas (*key spring*) sebelum melepaskan piston terhadap panjang kunci pegas setelah memantul atau jarak yang ditempuh oleh piston setelah memantul (Aydin dan Basu, 2005).

Prosedur pengujian mulai dari preparasi sampel sampai dengan penggunaan alat *Schmidt hammer* telah distandarisasi oleh *american society for testing and materials* (ASTM) dan *international society for rock mechanics* (ISRM). Tujuan dari standarisasi tersebut adalah untuk memastikan nilai-nilai yang konsisten, dapat dipercaya dan dapat digunakan sebagai korelasi untuk beberapa jenis batuan tertentu (Aydin dan Basu, 2005). Aydin (2008) telah memberikan revisi terbaru terhadap standar ISRM untuk pengukuran *Schmidt hammer*.

Pengujian *Schmidt hammer* harus menggunakan sampel dalam keadaan utuh (bebas dari retakan retak), petrografi seragam, dan mewakili massa batuan yang dominan (diidentifikasi dari *core*). Permukaan uji adalah yang utama di bawah ujung *plunger* (titik pengujian), harus halus, dan bebas dari debu maupun partikel. Pengujian yang dilakukan secara langsung di lapangan dapat menggunakan batuan yang abrasif dengan butir menengah untuk memperhalus permukaan yang kasar dari batuan keras (Aydin, 2008).



Gambar 2.4 Prinsip kerja *Schmidt hammer* (Aydin, 2008)

Amplas halus dapat digunakan untuk menghaluskan permukaan sample *coring* dan blok, terutama ketika pengeboran atau dari hasil batuan yang dipotong menggunakan mesin pemotong. Sampel yang akan diuji harus dalam keadaan kering sebelum pengujian dan jika hal ini tidak memungkinkan, tingkat kelembaban permukaan dan batuan secara keseluruhan harus dicatat sebagai basah atau lembab (Aydin, 2008).

Sampel yang berbentuk *core* atau hasil pemboran harus memiliki ukuran minimal NX ($\geq 54,7$ mm) untuk *Schmidt hammer* jenis L dan sebaiknya ukuran T2 (≥ 84 mm) untuk jenis N. Sampel yang berbentuk balok harus memiliki ketebalan minimal 100 mm pada titik pengujian atau titik dampak. Pemilihan titik pengujian untuk sampel yang berbentuk *core* harus merupakan salah satu jari-jari dari ujung terdekat dari sampel *core* sedangkan untuk sampel yang berbentuk balok harus setengah ketebalan dari batas sampel, hal ini bertujuan untuk memberikan derajat pengekanan yang sama dari segala arah. Panjang *core* dan luas

permukaan blok harus cukup besar untuk menampung 20 kali pembacaan, misalnya jika jarak 2 cm dari titik dampak yang dipilih, panjang inti dari 43,5 cm (untuk ukuran NX) atau area blok permukaan 268 cm² (untuk ketebalan 10 cm) (Aydin, 2008).

Pengujian *Schmidt hammer* ini umumnya tidak merusak sampel batuan dan digunakan untuk batuan dengan minimal kekuatan moderat (>80 MPa), dan sampel yang sama dapat digunakan untuk penentuan UCS dan modulus Young. Sampel batuan yang mengalami retakan, berpori, lapuk, pori batuan rapuh, dan mempunyai butiran yang telah hancur harus menggunakan sampel yang berbeda untuk menentukan UCS dan modulus Young (Aydin, 2008).

Pengumpulan data 20 nilai pantul atau *rebound* harus dilakukan. Seperti yang direkomendasikan oleh metode ISRM, disarankan sebelumnya harus dicatat dari dampak tunggal yang dipisahkan oleh setidaknya diameter *plunger* (untuk disesuaikan dengan luasnya darah dan retakan radial). Pengujian ini dapat dihentikan bila ada sepuluh pembacaan berikutnya yang hanya memiliki perbedaan empat nilai pantul dari sepuluh titik pengujian (sesuai dengan tingkat pengulangan SH yaitu ± 2) (Aydin, 2008).

c. Kelebihan dan kekurangan *Schmidt hammer*

Schmidt hammer memiliki banyak kelebihan untuk penelitian geomorfologi tetapi untuk penggunaan yang efektif perlu juga diketahui bahwa *Schmidt hammer* memiliki beberapa keterbatasan atau kelemahan (Goudie, 2006). Berikut beberapa kelebihan dan kekurangan *Schmidt hammer*.

1. Kelebihan *Schmidt hammer*

- a. Portabilitas atau mudah dibawa (berat antara 1,7 dan 2,3 kg).
- b. Harganya yang murah (US\$ 670 untuk tipe N).
- c. Mampu untuk membuat banyak pembacaan secara langsung di lapangan.

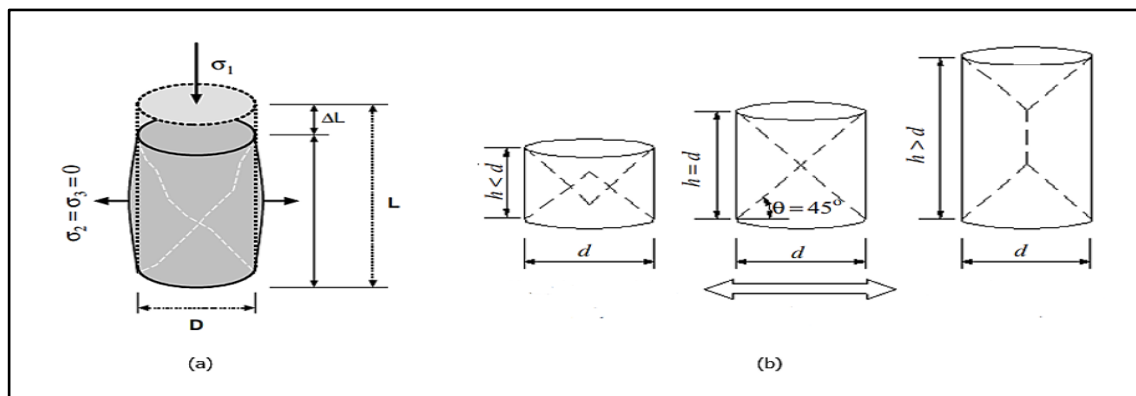
- d. Sederhana.
 - e. Bukti empiris menunjukkan bahwa nilai-nilai R (nilai pantul) berkorelasi dengan baik terhadap sifat batuan lainnya (Goudie, 2006).
 - f. Suhu tidak memiliki pengaruh yang cukup besar pada nilai R (Goudie, 2006).
 - g. Tidak merusak sampel (Saptono, 2013).
2. Kekurangan *Schmidt hammer*
- a. Hal ini sangat sensitif terhadap diskontinuitas dalam batuan. Oleh karena itu, belahan, foliasi erat, dan laminasi yang terdapat pada batuan tidak dapat dengan mudah diselidiki dengan metode ini (Goudie, 2006).
 - b. Pengujian *Schmidt hammer* sensitif terhadap kadar air, terutama dalam batuan lemah (Aydin dan Basu, 2005).
 - c. Apabila menggunakan sampel berbentuk blok, maka blok yang digunakan harus menunjukkan massa batuan secara signifikan, dan pengujian tidak dapat digunakan blok batuan yang kecil dan ringan (Goudie, 2006)
 - d. Jenis palu, normalisasi nilai pantul, batuan dimensi, kehalusan permukaan, pelapukan, kadar air, proses pengujian, reduksi data, dan prosedur analisis akan memengaruhi konsistensi dan reliabilitas hasil pengujian *Schmidt hammer* (Aydin dan Basu, 2005).
 - e. Umur palu memengaruhi nilai hasil pengujian (Goudie, 2006).

2.3.2 Kuat Tekan Uniaksial (UCS)

Kekuatan batuan dapat diperoleh dari pengujian uniaksial yang bergantung pada kadar air batuan, sifat anisotropi, dan prosedur tes yang digunakan (BSI, 2010). Kuat tekan uniaksial digunakan untuk menentukan kuat tekan batuan (σ_c), modulus Young (E), dan nisbah Poisson (ν). Pengujian ini dilakukan dengan menekan batuan di antara dua pelat yang akan menginduksi tegangan ke batuan. Tegangan aksial merupakan

variabel bebas terkontrol, sedangkan regangan aksial adalah variabel dependen. Perubahan pada batuan dapat diukur menggunakan *dial gauge* yang diletakkan secara aksial untuk mengukur perubahan jarak antarpelat penekan dan secara lateral untuk mengukur perubahan batuan secara horizontal. Regangan aksial dapat diperoleh dengan membandingkan perubahan panjang batuan dengan panjang awal batuan ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$). Jika gaya yang diberikan uniaksial, maka modulus Young dapat diperoleh dari perbandingan antara tegangan dan regangan ($E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$). Gaya tekan pelat akan meningkat secara perlahan hingga terjadi keruntuhan pada batuan. Tekanan terakhir yang membuat batuan pecah merupakan nilai kuat tekan batuan (Jaeger *et al.*, 2007).

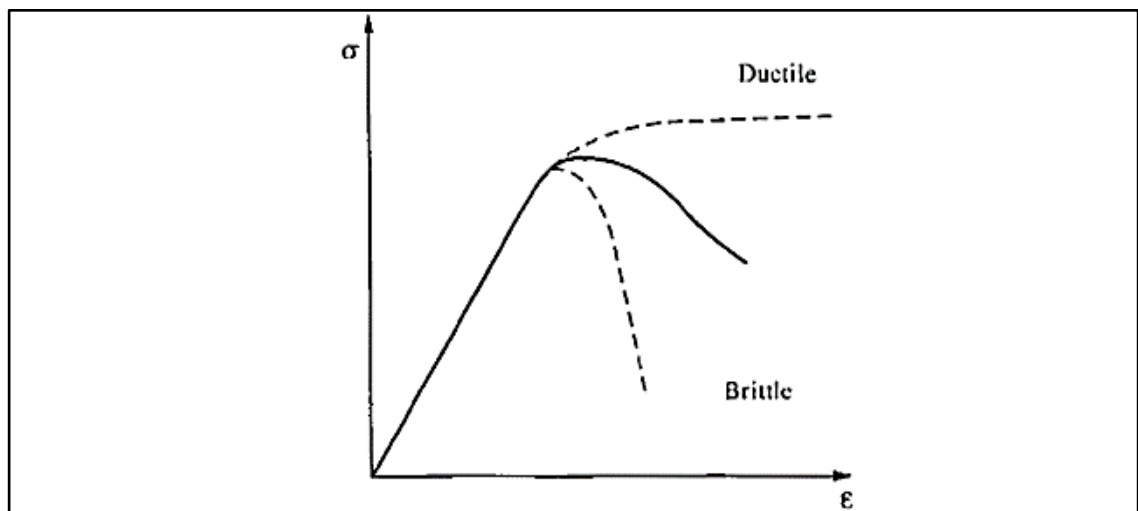
Menurut ISRM 1979 syarat sampel batuan uji kuat tekan berbentuk silinder dengan perbandingan L/D antara 2,5–3 dan untuk diameter tidak kurang dari 54 mm sedangkan menurut ASTM 1991 perbandingan L/D batuan antara 2–2,5 dengan diameter 47 mm. Sampel batuan yang memiliki L/D > 2,5 akan menunjukkan nilai UCS yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang memiliki perbandingan L/D < 2,5. Sampel dengan kondisi perbandingan L/D = 1 akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar karena tegangan yang bekerja pada batuan akan saling bertemu. Distribusi tegangan pada batuan saat diberikan tekanan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 (a) Perubahan dimensi dan arah deformasi pada sampel batuan uji kuat tekan uniaksial (Thuro, 2001); (b) Pola distribusi gaya uniaksial pada berbagai dimensi sampel batuan (Kim dan Yi, 2002)

Pada Gambar 2.5 ditunjukkan bahwa kekuatan batuan 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.

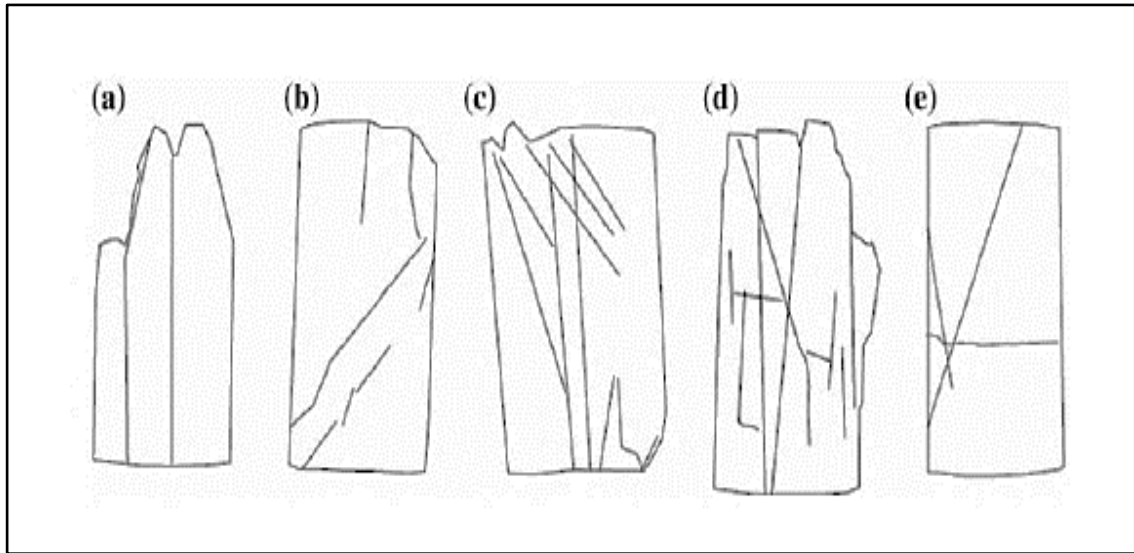
Uji kuat tekan uniaksial pada sampel batuan dilakukan dengan pemberian beban pada arah aksial hingga batuan mengalami retak dan pecah. Jenis keruntuhan yang pada batuan terbagi menjadi dua, yaitu brittle yang menunjukkan ciri batuan yang akan mengalami keruntuhan secara tiba-tiba dan duktil yang menunjukkan ciri akan mengalami deformasi yang besar sebelum terjadi keruntuhan. Batuan memiliki sifat duktil pada saat mengalami tekanan pemampatan tinggi maupun temperatur yang tinggi. Bentuk grafik keruntuhan pada batuan ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Grafik perbedaan keruntuhan batuan yang bersifat brittle dan duktil (Hudson dan Harrison, 1997)

Pada uji kuat tekan uniaksial terdapat beberapa tipe keruntuhan. Tipe keruntuhan yang terjadi pada batuan 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*,

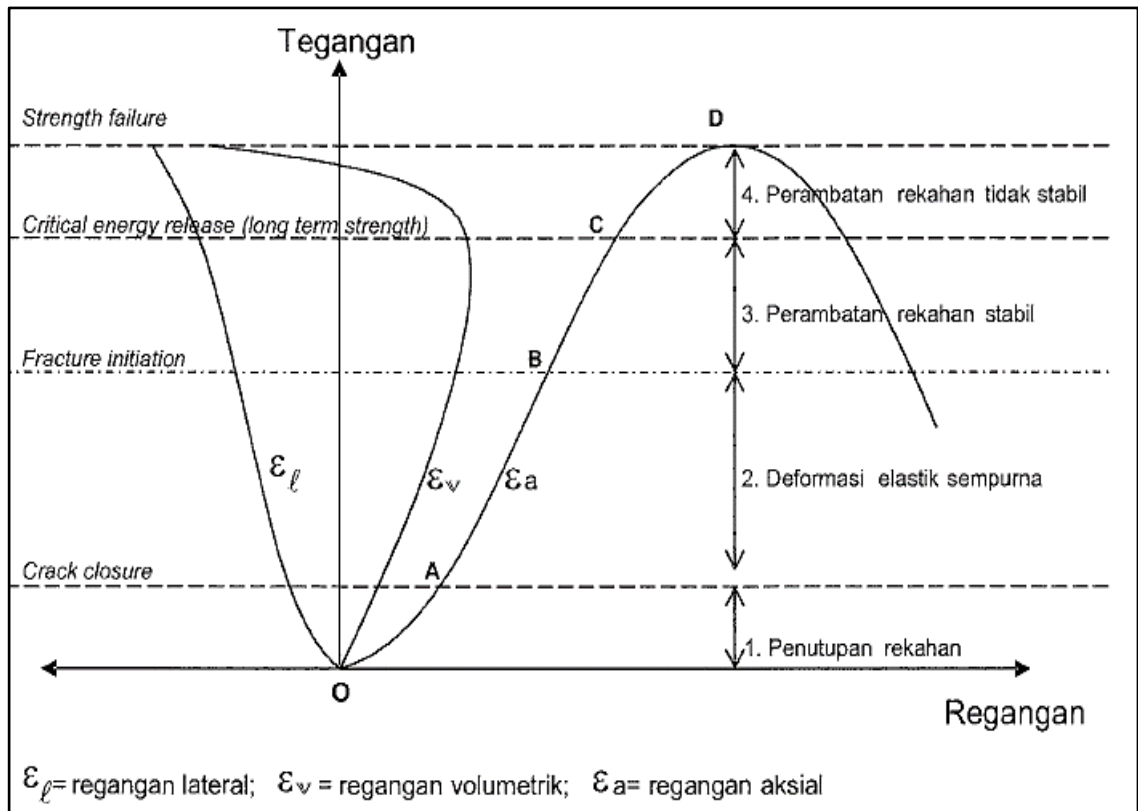
shearing along plane, axial splitting with shearing, multiple fracturing, dan failure along foliation (Singh *et al.*, 2019). Tipe keruntuhan pada batuan uji kuat tekan uniaksial dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Tipe keruntuhan pada batuan 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 sampel 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 batuan akan runtuh akibat adanya gaya tarik yang bekerja. *Multiple fracturing* terjadi ketika keruntuhan yang terjadi pada batuan 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 sampel batuan yang diuji. Kurva tegangan regangan hasil uji kuat tekan uniaksial dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 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 batuan hancur (kN)
- A = luas penampang awal batuan (mm²)

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

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

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

Keterangan:

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

2.3.3 Modulus Elastisitas (Modulus Young/E)

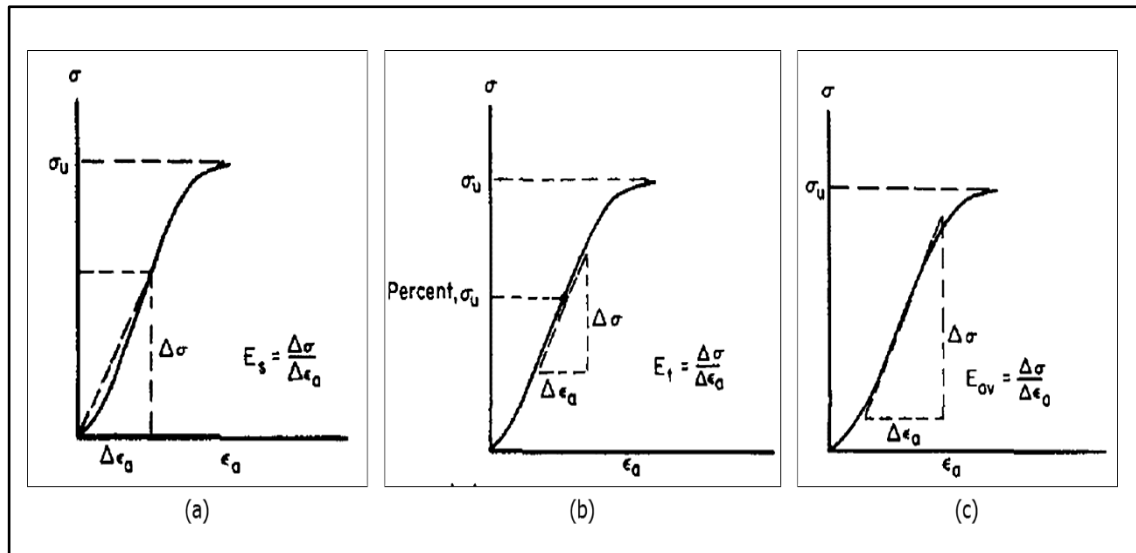
Modulus Young adalah kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastisnya. Pada uji kuat tekan uniaksial, batuan batuan yang diberi tekanan akan mengalami beberapa tahap deformasi, yakni deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis merupakan perubahan bentuk pada benda saat gaya bekerja dan akan berhenti ketika gaya ditiadakan sedangkan deformasi plastis merupakan perubahan bentuk benda yang bersifat permanen dan bentuk benda akan tetap meski gaya ditiadakan. Nilai modulus Young diturunkan dari kemiringan kurva tegangan-regangan pada bagian yang linear karena pada saat itu batuan akan mengalami deformasi elastik. Nilai modulus Young batuan dapat diperoleh menggunakan Persamaan 2.14 (Rai dkk., 2014).

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

Keterangan:

- E = modulus Young (MPa)
- $\Delta\sigma$ = beda tegangan (MPa)
- $\Delta\varepsilon_a$ = beda regangan aksial (%)

Modulus Young 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 Young ini dapat dilihat pada Gambar 2.9 (Rai dkk., 2014).



Gambar 2.9 (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 Young yang diukur dari tegangan sama dengan 0 % sampai nilai tegangan mencapai 50 %.
2. Modulus tangen (*tangent Young's modulus/ E_t*), merupakan modulus Young 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 Young yang diukur dari rata-rata kemiringan kurva atau bagian linier yang terbesar dari kurva.

2.3.4 Nisbah Poisson (*Poisson Ratio/ ν*)

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 sampel batuan silinder diberikan tegangan pada arah aksialnya, maka batuan 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	$0,4 < \nu < 0,5$

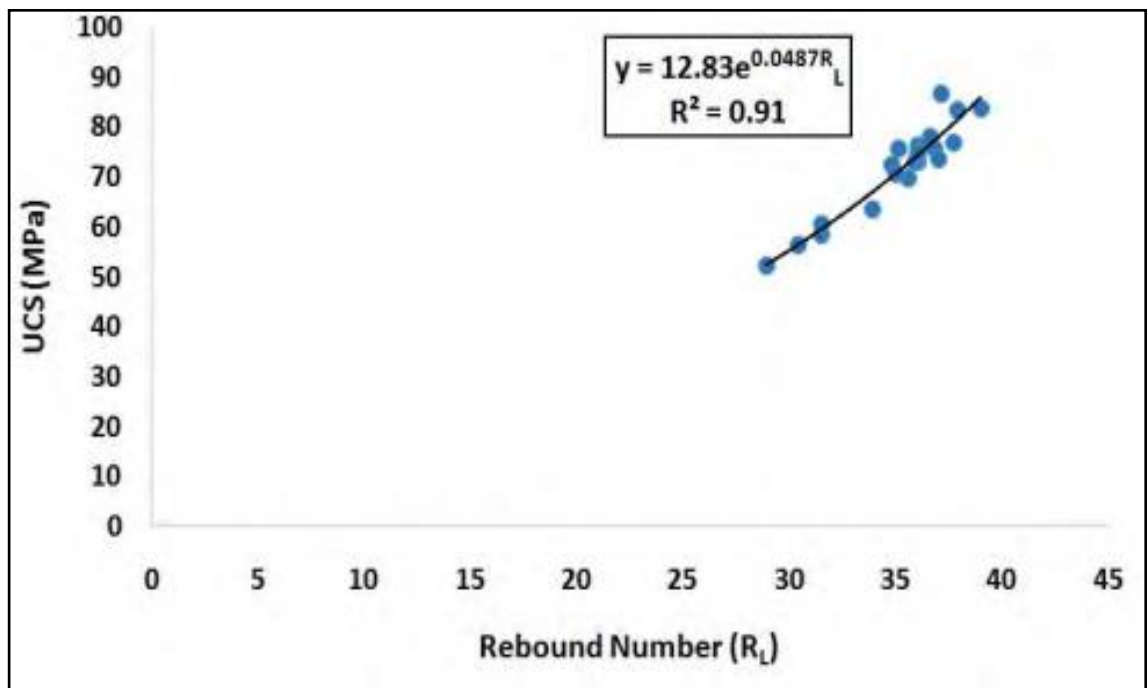
2.3.5 Korelasi *Schmidt Hammer* dengan UCS

Salah satu sifat rekayasa penting dari batuan yang memainkan peran penting dalam merancang berbagai aplikasi geoteknik seperti terowongan dan bendungan adalah kuat tekan uniaksial (UCS) dari sampel sampel yang berbentuk *core* (Bieniawski, 1976). Pengujian UCS memakan biaya yang mahal dan membutuhkan waktu yang lama serta tidak selalu praktis terutama dalam kasus sampel batuan yang sangat lapuk (Nazir *et al.*, 2013). Nilai kuat tekan uniaksial dapat ditentukan melalui pengujian pada laboratorium atau dapat menggunakan metode indeks. Salah satu metode indeks yang dapat digunakan untuk menentukan kuat tekan uniaksial adalah dengan menggunakan *Schmidt hammer* (Saptono, 2013).

Schmidt hammer telah digunakan di seluruh dunia sebagai pengujian indeks yang cepat untuk menentukan kekuatan batuan dan karakterisasi deformabilitas, hal ini disebabkan karena *Schmidt hammer* mudah untuk digunakan, dapat mudah dibawah biaya rendah dan dapat dilakukan dengan waktu yang singkat serta bersifat tidak merusak sampel (Yilmaz *and* Sendir, 2002). Menurut Nazir *et al.* (2013), pengujian *Schmidt hammer* merupakan pengujian yang cepat dan murah dan dapat digunakan untuk memprediksi kuat tekan bebas atau UCS. Ada banyak karya tulis yang diterbitkan yang berfokus untuk mendapatkan korelasi antara *Schmidt hammer* dengan UCS. Berikut beberapa korelasi antara *Schmidt hammer* dengan UCS.

1. Korelasi Nazir *et al.*

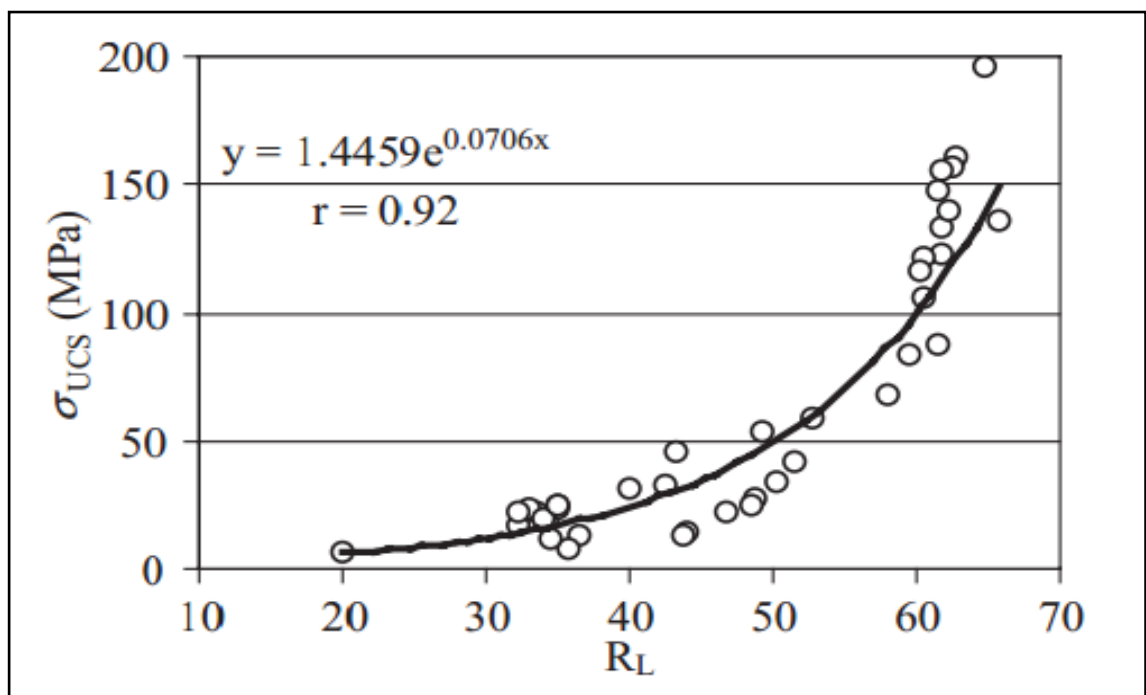
Nazir *et al.* (2013) telah melakukan penelitian mengenai korelasi antara *Schmidt hammer* dengan uji kuat tekan uniaksial. Penentuan korelasi dilakukan dengan melakukan pengujian *Schmidt hammer* dan uji UCS menggunakan sampel batugamping. Pengujian *Schmidt hammer* dan uji kuat tekan uniaksial dilakukan berdasarkan standar prosedur pengukuran yang ditetapkan oleh *international society of rock mechanic*. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 20. Korelasi yang diperoleh UCS (MPa) = $12.83e^{0.0487R_L}$. Korelasi Nazir *et al.* memiliki regresi yang cukup tinggi yaitu 0,91, hal ini menunjukkan nilai uji kuat tekan bebas prediksi menggunakan *Schmidt hammer* mendekati nilai uji kuat tekan bebas sebenarnya. Korelasi antara *Schmidt hammer* dengan UCS ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Korelasi antara *Schmidt hammer* dan UCS (Nazir *et al.*, 2013)

2. Korelasi Aydin dan Basu

Aydin dan Basu (2005) telah melakukan penelitian mengenai korelasi antara *Schmidt hammer* dengan uji kuat tekan uniaksial (*unconfined compressive strength*). Pengujian *Schmidt hammer* dan uji kuat tekan uniaksial menggunakan sampel Batugranit dan dilakukan berdasarkan standar prosedur pengukuran yang ditetapkan oleh *international society of rock mechanic*. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 40. Korelasi yang diperoleh adalah $UCS \text{ (MPa)} = 1,4459e^{0,0706x}$, dengan nilai regresi 0,92 dapat dilihat pada Gambar 2.11.

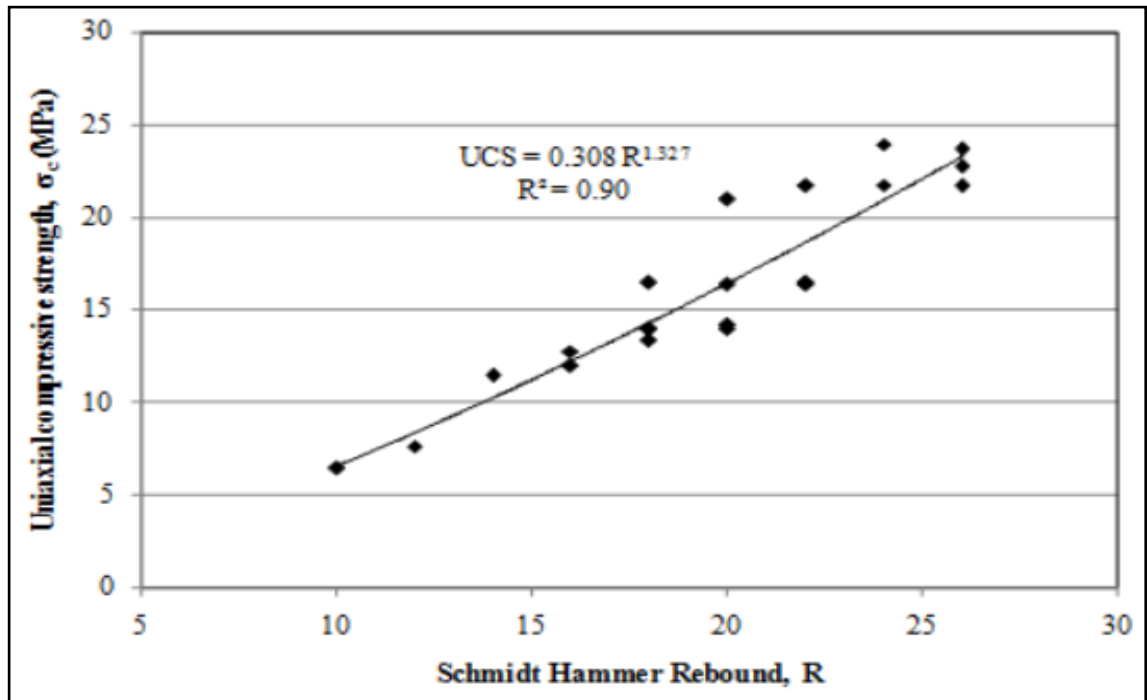


Gambar 2.11 Korelasi antara *Schmidt hammer* dan UCS (Aydin dan Basu, 2005)

3. Korelasi Saptono *et al.*

Saptono *et al.* (2013) telah melakukan penelitian mengenai korelasi antara *Schmidt hammer* dengan uji kuat tekan uniaksial. Pengujian *Schmidt hammer* dan uji UCS dilakukan menggunakan batuan *weak rock* yaitu batupasir dan batulumpur. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 18. Korelasi yang

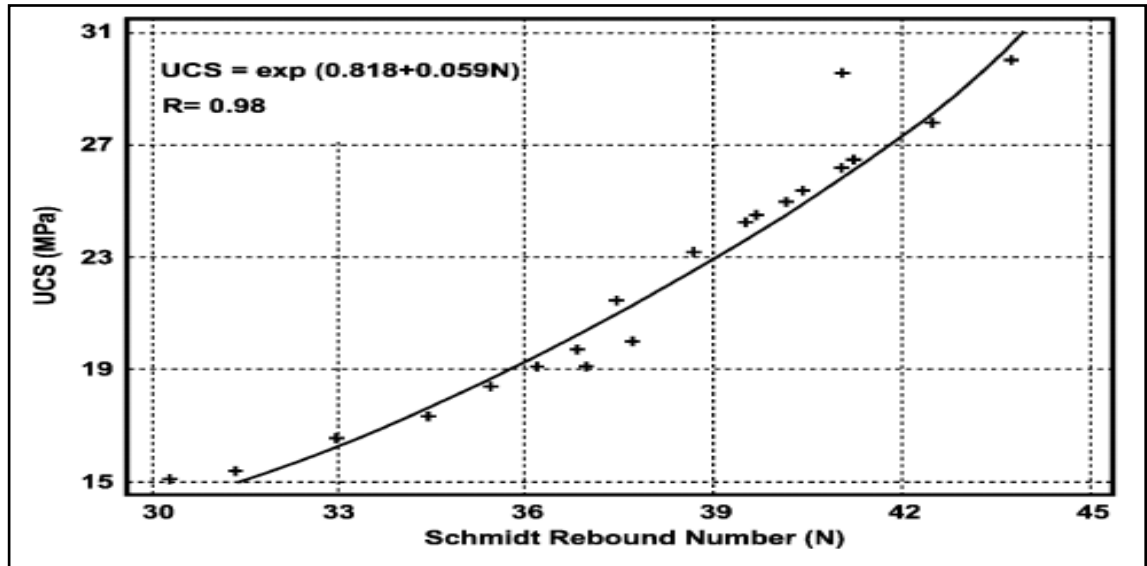
diperoleh $UCS \text{ (MPa)} = 0,308R^{1,327}$. Korelasi Saptono *et al.* memiliki regresi yang cukup tinggi yaitu 0,91 yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Korelasi antara *Schmidt hammer* dan UCS (Saptono *et al.*, 2013)

4. Korelasi Yilmaz dan Sendir

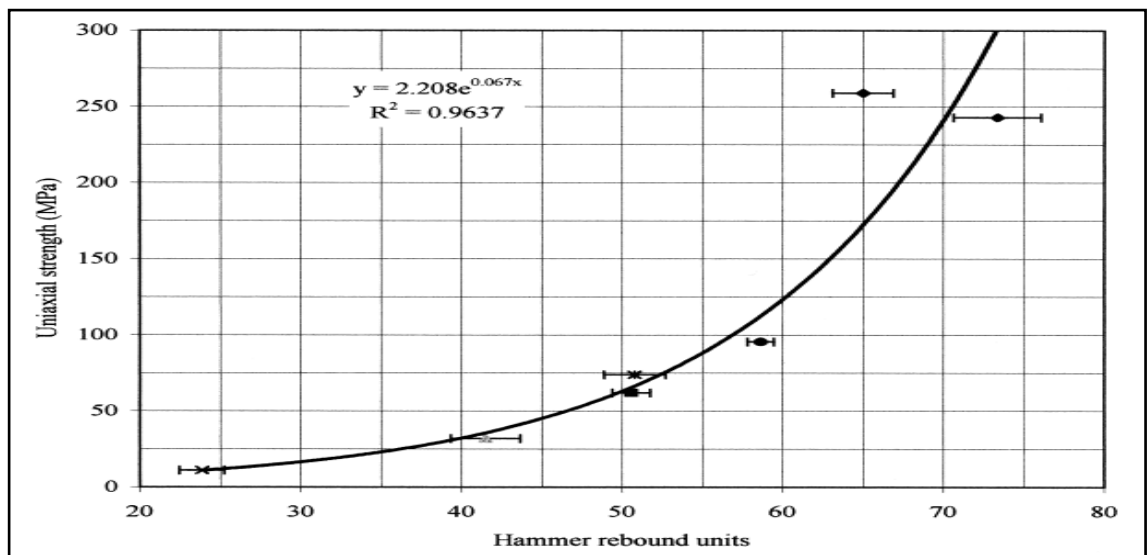
Yilmaz *and* Sendir (2002) telah melakukan penelitian mengenai korelasi antara *Schmidt hammer* dengan uji kuat tekan uniaksial. Pengujian *Schmidt hammer* dan uji kuat tekan uniaksial menggunakan sampel gipsum dan dilakukan berdasarkan standar prosedur pengukuran yang ditetapkan oleh *international society of rock mechanic*. Korelasi yang diperoleh $UCS \text{ (MPa)} = \exp(0,818+0,059N)$. Korelasi Yilmaz dan Sendir memiliki regresi yang sangat tinggi yaitu 0,98. Hal ini menunjukkan nilai uji kuat tekan uniaksial prediksi menggunakan *Schmidt hammer* mendekati nilai uji kuat tekan bebas sebenarnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Korelasi antara *Schmidt hammer* dan UCS (Yilmaz and Sendir, 2002)

5. Korelasi Katz *et al.*

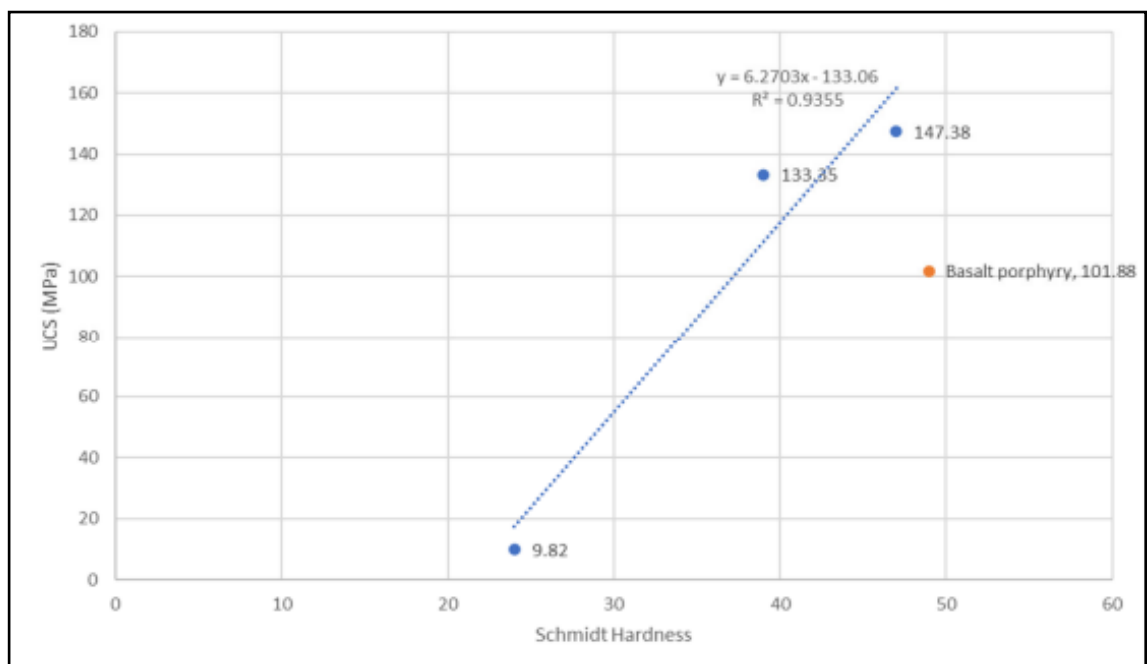
Katz *et al.* (2000) telah melakukan penelitian mengenai korelasi antara *Schmidt hammer* dengan uji kuat tekan uniaksial. Pengujian *Schmidt hammer* dan UCS dilakukan menggunakan 7 jenis batuan yang berbeda dan dilakukan berdasarkan standar prosedur pengukuran yang ditetapkan oleh *international society of rock mechanic*. Korelasi yang diperoleh UCS (MPa)= $2,208e^{1,327x}$. Korelasi Katz *et al.* memiliki regresi tinggi yaitu 0,96 yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Korelasi antara *Schmidt hammer* dan UCS (Katz *et al.*, 2000)

6. Korelasi Qidahiyani *et al.*

Qidahiyani *et al.* (2021) telah melakukan penelitian mengenai korelasi antara *Schmidt hammer* dengan uji kuat tekan uniaksial. Pengujian *Schmidt hammer* dan UCS dilakukan menggunakan 4 jenis batuan yang berbeda dengan jumlah sampel sebanyak 8 sampel dan dilakukan berdasarkan standar prosedur pengukuran yang ditetapkan oleh *international society of rock mechanic*. Korelasi yang diperoleh $UCS \text{ (MPa)} = 6,2703SCH - 133,06$. Korelasi Qasidahiyani *et al.* memiliki regresi tinggi yaitu 0,94 yang dapat dilihat pada Gambar 2.15.

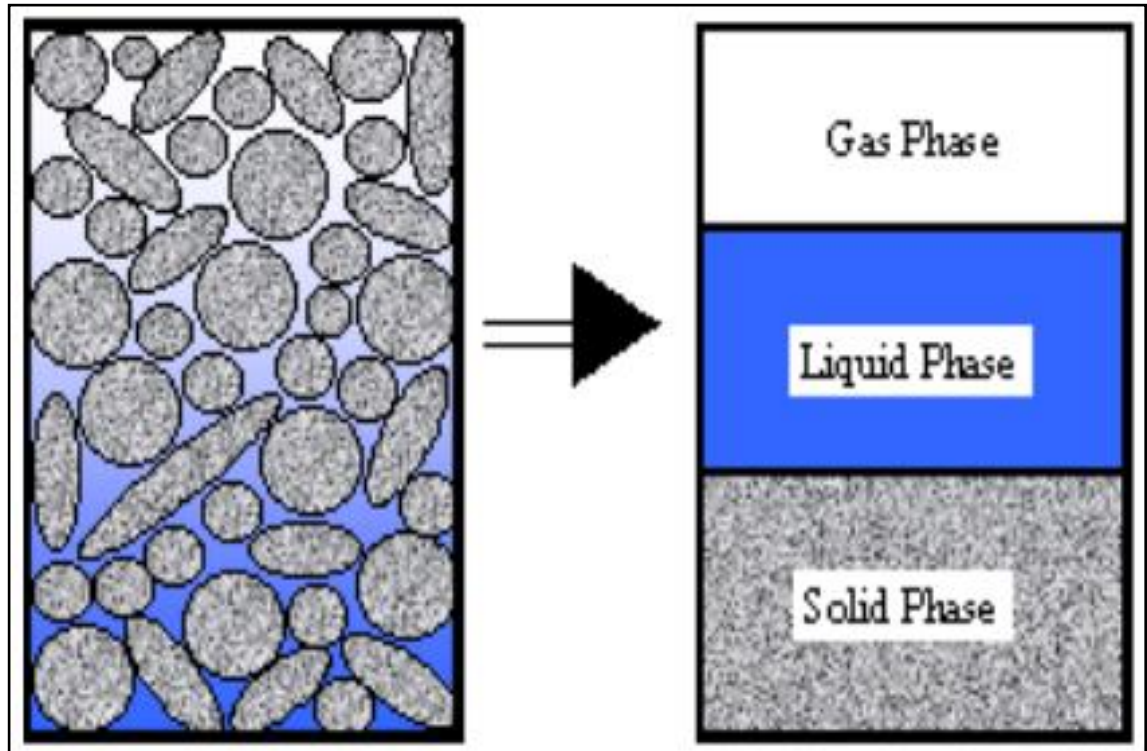


Gambar 2.15 Korelasi antara *Schmidt hammer* dan UCS (Qidahiyani *et al.*, 2021)

2.4 Kadar Air Batuan

Sifat fisik merupakan karakteristik dasar batuan yang memengaruhi perilaku batuan. Perbedaan komposisi padatan, air, dan udara seperti yang terlihat pada Gambar 2.16 dari setiap batuan menyebabkan terjadinya perbedaan perilaku tersebut yang pada akhirnya berkaitan erat dengan kekuatan batuan saat dilakukan pengujian sifat mekanis

(Lashkaripour dan Ajalloeian, 2015). Komposisi batuan secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Komposisi batuan secara umum (Lashkaripour dan Ajalloeian, 2015)

Kadar air atau kandungan air batuan merupakan salah satu parameter penting dalam proyek rekayasa khususnya pada proyek yang berhubungan dengan batuan sedimen berbutir halus (Lashkaripour dan Ajalloeian, 2015). Hal ini disebabkan peningkatan kandungan air yang terdapat di dalam batuan akan mengubah fisik dan sifat mekanis batuan seperti densitas (Vasarhelyi, 2005), kohesi dan sudut geser dalam (Saptono *et al.*, 2013), kuat tekan batuan (Lashkaripour dan Ajalloeian, 2015; Vasarhelyi, 2005; Sachpazis, 1990; Vasarhelyi dan Van, 2006; Agustiwijaya, 2007) dan modulus Young (Verma *et al.*, 2014).

Water content atau *moisture content* adalah rasio atau perbandingan antara massa air yang terkandung dalam ruang pori material tanah atau batuan terhadap massa

partikel *solid* atau padat. Kandungan air dinyatakan dalam bentuk persentase (ASTM, 2011). Perhitungan kandungan air pada material sebagai berikut:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.16)$$

dimana w adalah kandungan air, M_w adalah massa sampel dalam keadaan jenuh atau basah dan M_s massa sampel dalam keadaan kering.

2.4.1 Jenis Kadar Air pada Batuan

Kadar air pada batuan dibedakan menjadi tiga jenis yaitu (Said, 2008):

1. *Inherent moisture* adalah *moisture* yang dianggap terdapat di dalam rongga-rongga kapiler dan pori-pori batubara yang relatif kecil, pada kedalaman aslinya yang secara teori dinyatakan bahwa kondisi tersebut ialah kondisi dengan tingkat kelembapan 100 % serta suhu 30 °C. *Moisture holding capacity* (MHC) merupakan istilah lain dari *inherent moisture* yang dipakai oleh *international standard* (ISO), *British Standard* (BS) dan *Australia Standard* (AS), sedangkan *American Standard* (ASTM) mempergunakan istilah *equipment moisture*. *Moisture holding capacity* dan *equilibrium moisture* adalah istilah yang dipergunakan untuk nama pengujian. Air ini dapat dihilangkan dengan suhu pemanasan 105–110 °C.
2. *Adherent moisture* adalah *moisture* yang dianggap terdapat pada permukaan batuan dan pori-pori batuan yang relatif besar. *Surface moisture* adalah istilah lain yang dipergunakan oleh *international standard* (ISO), *British Standard* (BS) dan *Australia Standard* (AS), sedangkan *American Standard* (ASTM) mempergunakan istilah *free moisture*.
3. Kadar air total merupakan jumlah dari kadar air bebas (*adherent*) ditambah dengan kadar air bawaan (*inherent*).

2.4.2 Pengaruh Kadar Air terhadap Densitas Batuan

Vasarhelyi (2005) melakukan penelitian mengenai analisis statistik dari pengaruh kandungan air terhadap kekuatan batugamping. Pengujian sifat fisik dilakukan untuk menentukan hubungan antara pengaruh densitas batuan terhadap kuat tekan batuan. Hasil pengujian menunjukkan sampel batuan dalam keadaan kering akan memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan sampel batuan dalam keadaan jenuh air. Nilai kandungan air sampel dalam keadaan kering berkisar antara 1,392–2,409 gram/cm³ sedangkan kandungan air sampel dalam keadaan jenuh air berkisar antara 1,720–2,458 gram/cm³. Sampel batuan dalam keadaan jenuh air memiliki densitas batuan lebih besar dibandingkan dalam keadaan kering dikarenakan massa batuan dalam keadaan jenuh lebih besar akibat penambahan massa air, sehingga perbandingan antara massa dan volume (densitas) batuan juga akan menjadi lebih besar.

2.4.3 Pengaruh Kadar Air terhadap Kuat Tekan Batuan

Kandungan air merupakan salah satu faktor yang paling penting yang memengaruhi kekuatan batuan (Vasarhelyi dan Van, 2006), seperti misalnya nilai kuat tekan suatu batuan (Lashkaripour dan Ajalloeian, 2015; Vasarhelyi, 2005; Sachpazis, 1990; Vasarhelyi dan Van, 2006; Agustiwijaya, 2007). Kuat tekan batuan akan mengalami penurunan ketika porositas meningkat. Kandungan air yang terdapat dalam pori batuan akan mengurangi besarnya gesekan internal batuan sehingga mengurangi kekuatan batuan (Indian Berau of Mines, 2014). Menurut Vasarhelyi dan Van (2006), kandungan air yang terdapat pada batuan akan mengurangi kuat tekan batuan dikarenakan terjadi peningkatan tekanan air di dalam pori batuan sehingga menyebabkan terjadinya pertumbuhan retakan-retakan baru atau *cracks* pada batuan. Kekuatan sampel batuan dalam keadaan basah memiliki 1/3 dari sampel batuan yang kering (Indian Berau of Mines, 2014). Kuat tekan batuan akan mengalami penurunan

apabila terjadi peningkatan kandungan air walaupun peningkatannya hanya sebesar 1 % (Agustiwijaya, 2007).

Agustiwijaya (2007) melakukan penelitian mengenai pengaruh kandungan air dan pelapukan terhadap kuat tekan uniaksial batuan. Sampel dibagi atas 2 tipe berdasarkan derajat saturasi air yaitu kering atau *dry* (saturasi 0 %) dan saturasi penuh atau *fully saturated*. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 39 yang terdiri dari batupasir dan batulanau. Pengurangan nilai kuat tekan sampai dengan 75 % dalam keadaan saturasi penuh. Nilai rata-rata kuat tekan batuan dalam keadaan jenuh mengalami penurunan sebesar 38 %. Tabel 2.2 menunjukkan pengaruh saturasi terhadap nilai kuat tekan uniaksial.

Tabel 2.2 Pengaruh saturasi dalam kuat tekan uniaksial (Agustiwijaya, 2007)

<i>Rock type</i>	<i>Weathering</i>	<i>UCS ave. (MPA)</i>		<i>Reduction (%)</i>	<i>Mean (%)</i>
		<i>Dry</i>	<i>Sat</i>		
<i>DV Sandstone</i>	<i>DW</i>	3,72	2,84	23,5	
<i>DV Sandstone</i>	<i>DST</i>	1,79	1,64	8,2	
<i>GW Siltstone</i>	<i>DW</i>	4,7	1,16	75,4	38,2
<i>MCSiltstone</i>	<i>DW</i>	5,36	3,99	25,6	
<i>OTM Sandstone</i>	<i>DW</i>	4,92	2,05	58,4	

Vasarhelyi (2005) melakukan penelitian mengenai pengaruh kandungan air terhadap sifat mekanis batuan. Sampel dibagi kedalam 2 tipe berdasarkan derajat saturasi air yaitu kering atau *dry* ($w = 0\%$) dan saturasi penuh atau *fully saturated* ($w = 1$). Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 45 yang terdiri dari batugamping miosen. Nilai kuat tekan uniaksial batuan dalam keadan kering berkisar antara 1,82 MPa sampai dengan 38,8 MPa sedangkan nilai kuat tekan batuan dalam keadaan jenuh berkisar antara 1,64 MPa sampai dengan 27,6 MPa.

Verma *et al.* (2014) melakukan penelitian mengenai pengaruh kandungan air terhadap sifat geoteknik atau *geotechnical properties*. Sampel yang digunakan dalam pengujian adalah batuan beku basal yang mempunyai kandungan air yang bervariasi, berkisar antara 1,18 % sampai dengan 3,29 %. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 29 sampel. Nilai kuat tekan uniaksial batuan dalam keadaan kering berkisar antara 43,27 MPa sampai dengan 72,09 MPa sedangkan nilai kuat tekan batuan dalam keadaan jenuh berkisar antara 31,29 MPa sampai dengan 69,91 MPa. Pengaruh kandungan air terhadap nilai kuat tekan basal dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Pengaruh kandungan air terhadap nilai kuat tekan pada batuan beku basal (Verma *et al.*, 2014)

No	UCS (MPa), Kering	Kadar Air (%)	UCS (MPa), Basah
1	58,67	1,26	55,23
2	59,01	1,2	57,01
3	55,02	1,52	50,56
4	05.31	1,88	48,96
5	45,36	2,22	38,27
6	47,39	3,12	32,09
7	45,02	3,52	31,85
8	44,27	3,75	32,29
9	56,02	1,39	53,39
10	55,02	1,45	51,08
11	59,26	1,27	55,52
12	57,06	1,96	52,89
13	58,09	1,86	53,9
15	55,96	1,71	47,2
16	70,26	1,29	68,34
17	72,09	1,19	69,91
18	71,23	1,25	68,08
19	69,33	1,18	67,47
20	65,29	1,21	63,54
21	60,11	1,28	57,85

No	UCS (MPa), Kering	Kadar Air (%)	UCS (MPa), Basah
22	45,23	2,12	38,9
23	46,28	2,23	39,28
24	47,45	2,46	40,56
25	44,98	2,39	37,95
26	48,23	2,29	42,12
27	47,24	3,22	33,01
28	44,02	3,59	30,81
29	43,27	3,85	31,29

Sachpaziz (1990) melakukan penelitian mengenai *monitoring* atau pengawasan derajat metamorfisme pada 4 tahap proses alterasi dari batugamping murni menuju ke marmer murni. Beberapa pengujian sifat mekanik dilakukan menggunakan sampel dalam dua kondisi yaitu kondisi kering dan kondisi jenuh air. Nilai kuat tekan uniaksial batuan mengalami penurunan ketika dalam kondisi jenuh air. Nilai rata-rata kuat tekan uniaksial mengalami penurunan dengan kisaran antara 10–22 %. Tabel 2.4 menunjukkan nilai rata-rata kuat tekan batuan dalam kondisi kering dan jenuh berbeda-beda.

Tabel 2.4 Nilai rata-rata kuat tekan batuan kondisi kering dan jenuh air (Sachpaziz, 1990)

<i>Rock Grade</i>	<i>Dry UCS</i> (MPa)	<i>Sat UCS</i> (MPa)	<i>Decrease</i>
A	211,2	189,7	10%
B	106,1	94,6	11%
C	81,3	62,9	22%
D	87,8	74,8	15%

2.5 Analisis Regresi Linear dan Validasi Data

Analisis regresi linier merupakan analisis yang menggunakan dua variabel. Variabel pertama merupakan variabel bebas atau variabel yang memberikan pengaruh (*independent variabel*) dan variabel kedua merupakan variabel terkontrol atau variabel

yang dipengaruhi (*dependent variabel*). 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 2.17.

$$Y = a + bX \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan 2.17 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 variabel*), dan X adalah variabel yang memengaruhi variabel lain (*independent variabel*). Nilai koefisien regresi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.18 dan nilai konstanta dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.19 (Usman dan Akbar, 2012).

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$b = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (2.19)$$

Koefisien korelasi (r) merupakan angka yang menunjukkan keeratan hubungan antara dua variabel yang saling berpengaruh. Persamaan umum koefisien korelasi ditunjukkan pada Persamaan 2.20.

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \dots\dots\dots (2.20)$$

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 (Sugyono, 2018). Tabel 2.4 Menunjukkan tingkat keeratan hubungan berdasarkan nilai koefisien korelasi.

Tabel 2.5 Tingkat keeratan hubungan dua variabel berdasarkan nilai koefisien korelasi (Sugyono, 2018)

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

Model matematika yang telah didapatkan dari hasil pengolahan dan analisis data akan divalidasi dengan menggunakan analisis *absolute average relative error percentage* (AAREP), *root mean square error* (RMSE), dan *variance accounted for* (VAF) untuk mengetahui seberapa besar nilai *error* atau kesalahan dari model matematika yang didapatkan. Validasi menggunakan AAREP akan menentukan seberapa akurat antara nilai prediksi yang didapatkan dengan nilai aktual, validasi RMSE akan menentukan seberapa besar perbedaan antara nilai prediksi dengan nilai aktual, dan validasi VAF akan menentukan seberapa mirip nilai prediksi yang didapatkan terhadap nilai aktual menggunakan varians data (Aladejare, 2019). Rumus validasi AAREP, RMSE, dan VAF adalah sebagai berikut.

$$AAREP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)}{Y_i} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (2.21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{Var}(Y_i - \hat{Y}_i)}{\text{Var}(Y_i)} \right) \dots\dots\dots (2.23)$$

Keterangan:

Var = Varians

Y_i = Nilai Terukur

\hat{Y}_i = Nilai Prediksi

N = Jumlah Sampel

Nilai AAREP dan RMSE yang mendekati 0 menunjukkan bahwa model matematika yang dihasilkan terpercaya begitupun sebaliknya nilai AAREP dan RMSE yang mendekati 100 menunjukkan bahwa model matematika yang dihasilkan tidak terpercaya. Berbeda dengan VAF, semakin mendekati 100 menunjukkan model matematika yang dihasilkan terpercaya namun, nilai VAF yang mendekati 0 menunjukkan bahwa model matematika yang dihasilkan tidak terpercaya.