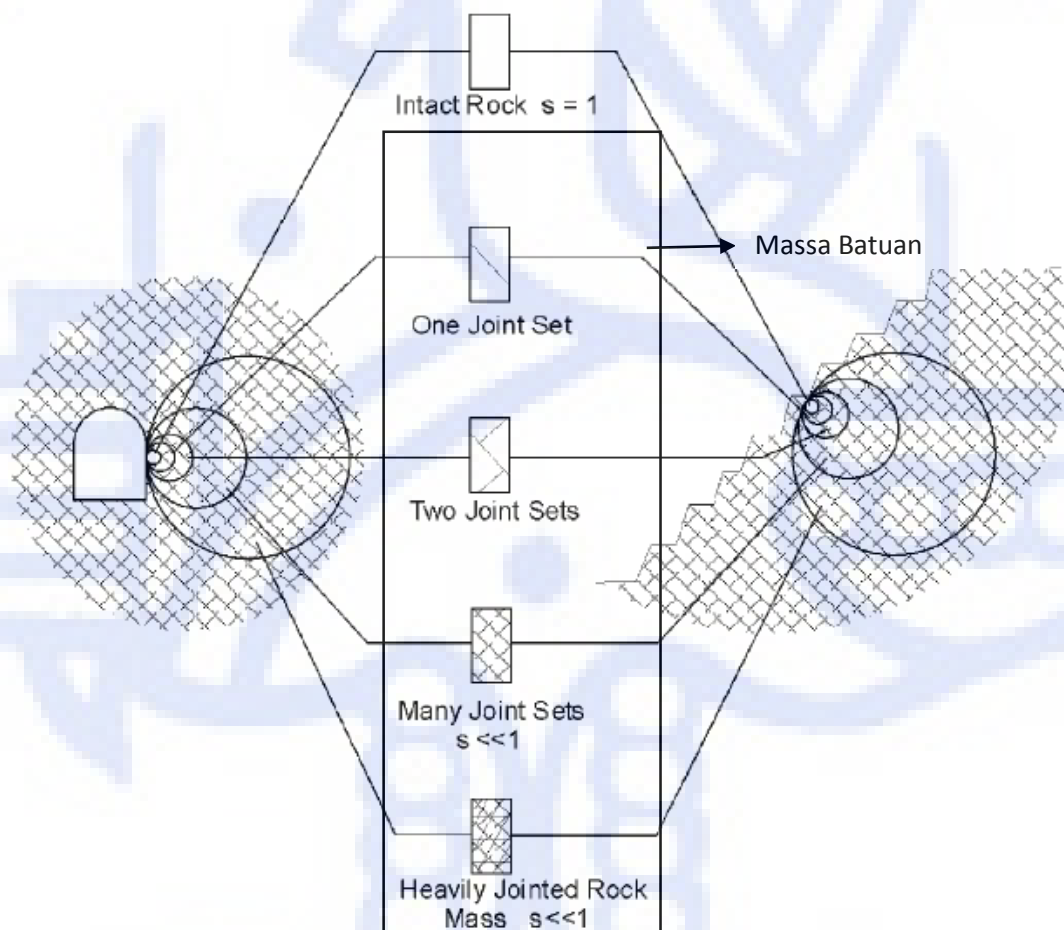


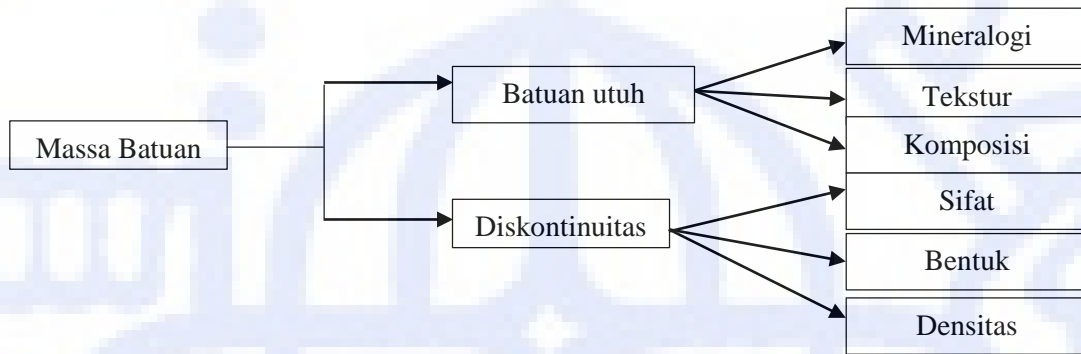
BAB II DASAR TEORI

2.1 Massa Batuan

Dalam melakukan analisa nilai massa batuan, harus diketahui terlebih dahulu apa yang dimaksud dengan massa batuan. Massa batuan didefinisikan sebagai tubuh batuan, di mana tubuh batuan tersebut akan dilakukan rekayasa (Gambar 2.1). Massa batuan diatur oleh karakteristik batuan utuh dan terdapat bidang-bidang diskontinuitas. Batuan utuh adalah bagian kecil dari massa batuan, di mana batuan utuh tersebut berfungsi untuk pengujian di laboratorium untuk mendapatkan karakteristik sifat fisik dari batuan tersebut (Gambar 2.2). Massa batuan berperan sangat penting dalam penentuan karakteristik massa batuan berdasarkan metode *Rock Mass Rating* (RMR) dan Sistem Q.



Gambar 2.1 Perbandingan antara batuan utuh dan massa batuan (Hoek, 1994 dalam Singh dan Goel, 2011)



Gambar 2.2 Penjelasan massa batuan (Palmstrom, 2001)

2.2 Diskontinuitas

Diskontinuitas merupakan bagian objek yang paling penting dalam massa batuan, karena kehadiran dari diskontinuitas dapat mempengaruhi nilai dari massa batuan. Menurut Hudson dan Harrison (1997) kata diskontinuitas menunjukkan segala pemisahan apapun dalam batuan yang memiliki nilai efektif kuat tarik nol, dan digunakan tanpa konotasi kode genetik. Menurut Palmstrom (2001), diskontinuitas adalah struktur atau kenampakan geologi yang mengubah homogenitas dari batuan, seperti kekar, bidang perlipatan, sesar minor, atau permukaan lemah seperti foliasi dan belahan.

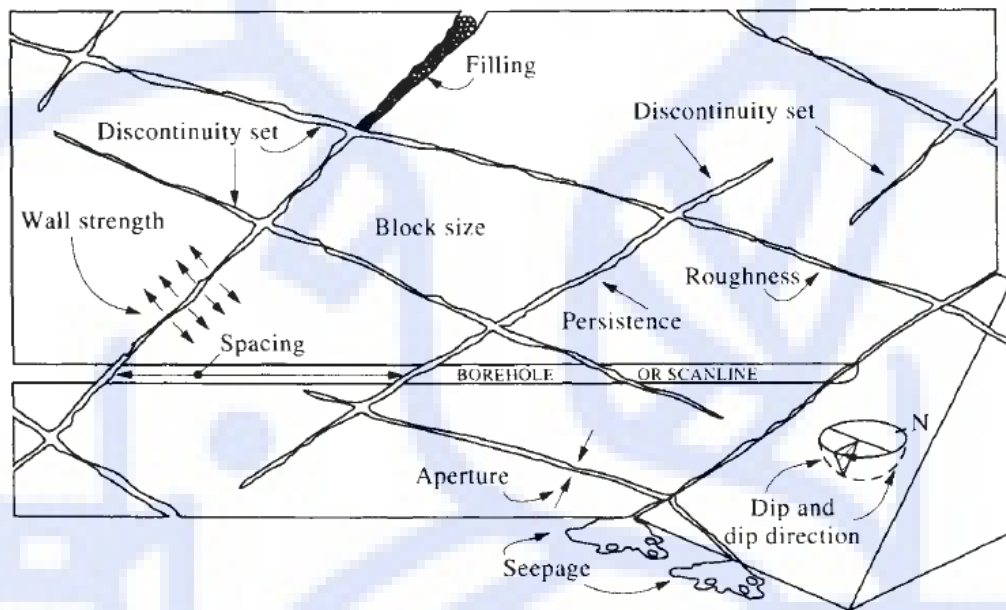
Bagian diskontinuitas pada massa batuan dapat diambil nilai-nilainya dengan cara metode *scanline*. Metode *scanline* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk melakukan pengumpulan data diskontinuitas. Metode ini dilakukan dengan cara menarik tali secara horizontal pada massa batuan dan mendeskripsikan setiap diskontinuitas yang melewati tali tersebut. Data-data *scanline* yang dideskripsi, antara lain isi diskontinuitas, panjang diskontinuitas, tingkat kekerasan, spasi diskontinuitas, bukaan, arah diskontinuitas, dan tipe diskontinuitas (Gambar 2.3).

2.3 Metode *Rock Mass Rating* (RMR)

Rock Mass Rating (RMR) adalah salah satu dari banyak pengklasifikasian massa batuan yang digunakan di dunia. RMR dikembangkan di Afrika Selatan bagian *Council of Scientific and Industrial Research* (CSIR) oleh Bieniawski pada tahun 1973. Metode RMR merupakan metode empiris dalam menentukan nilai pembobotan dari suatu massa batuan yang digunakan untuk menentukan ketahanan dari massa batuan dalam permasalahan penentuan sudut lereng maksimum, penentuan jenis perkuatan yang akan dipakai pada saat terowongan

dibangun, dan penentuan nilai daya dukung yang digunakan pada saat rekayasa pada massa batuan tersebut. RMR memiliki enam nilai parameter yang digunakan, antara lain:

1. Kekuatan batuan (*rock strength*) (R1);
2. *Rock quality designation* (RQD) (R2);
3. Jarak diskontinuitas (*discontinuity spacing*) (R3);
4. Kondisi diskontinuitas (*discontinuity condition*) (R4);
5. Kondisi aliran air (*groundwater condition*) (R5);
6. Orientasi diskontinuitas (*discontinuity orientation*) (R6).



Gambar 2.3 Sketsa geometri dari diskontinuitas yang terdapat pada massa batuan (Hudson dan Harrison, 1997)

Untuk menentukan nilai dari RMR tersebut adalah menjumlahkan nilai-nilai pembobotan dari enam parameter di atas seperti yang dilihat pada persamaan di bawah, dan kemudian menentukan tipe dari massa batuan tersebut berdasarkan dengan nilai RMR total yang didapat.

$$\text{RMR total} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$$

Enam parameter pada persamaan di atas akan lebih dijabarkan di bawah ini:

➤ Kekuatan Massa Batuan

Kekuatan massa batuan dapat diketahui dengan melakukan pengujian kuat tekan yang dilakukan di laboratorium atau dengan palu *Schmidt*. Hasilnya dapat diberikan nilai dengan melihat pada Tabel 2.1.

➤ *Rock Quality Designation (RQD)*

Nilai RQD adalah penentuan persentase kualitas massa batuan yang didasarkan dengan tingkat kerapatan dari diskontinuitas. Untuk mendapatkan nilai dari RQD bisa menggunakan hasil dari inti bor atau dengan cara pengamatan langsung pada massa batuan. Hasil dari nilai RQD akan memiliki nilai pembobotan yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Pembobotan untuk kekuatan massa batuan (Bieniawski, 1989)

<i>Compressive strength (MPa)</i>	<i>Rating</i>
250 >	15
100 – 250	12
50 – 100	7
25 – 50	4
5 – 25	2
1 – 5	1
< 1	0

Nilai RQD dari hasil pengeboran bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$RQD = \frac{\text{Jumlah panjang inti bor} > 10 \text{ cm}}{\text{Panjang total pengeboran}} \times 100\%$$

sementara nilai RQD dari hasil pengamatan massa batuan langsung dapat menggunakan persamaan:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0,1 \lambda} \cdot (0,1 \lambda + 1)$$

$$RQD = -3,68 \lambda + 110,4$$

λ = frekuensi diskontinuitas

Tabel 2.2 Pembobotan untuk persentase RQD (Bieniawski, 1989)

<i>RQD (%)</i>	<i>Rating</i>
< 25	3
25 – 50	8
50 – 75	13
75 – 90	17
90 – 100	20

➤ Jarak Diskontinuitas

Jarak diskontinuitas merupakan jarak antara diskontinuitas secara tegak lurus pada massa batuan. Penentuan nilai jarak diskontinuitas adalah membandingkan panjang *scanline* dengan banyaknya diskontinuitas. Pembobotan nilai dari jarak diskontinuitas dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Pembobotan untuk jarak antar diskontinuitas (Bieniawski, 1989)

<i>Spacing</i>	<i>Rating</i>
> 2 m	20
0.6 – 2 m	15
200 – 600 mm	10
60 – 200 mm	8
< 60 mm	5

➤ Kondisi Diskontinuitas

Secara umum, kondisi diskontinuitas dilihat berdasarkan kekasaran, material pengisi, lebar bukaan, dan tingkat pelapukan. Pengaruh dari kondisi diskontinuitas sangat besar dalam penentuan metode RMR ini. Pembobotan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Pembobotan pada kondisi diskontinuitas (Bieniawski, 1989)

<i>Description</i>	<i>Rating</i>
<i>Very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation</i>	30
<i>Rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm</i>	25
<i>Slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm</i>	20
<i>Slickensided wall rock surface, or 1-5 mm thick gouge, or 1-5 mm wide continuous discontinuity</i>	10
<i>5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity</i>	0

Terdapat lima parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai dari parameter kondisi diskontinuitas. Parameter tersebut adalah panjang diskontinuitas atau kemenerusan, bukaan dari diskontinuitas, tingkat dari kekasaran diskontinuitas, pengisi diskontinuitas,

dan tingkat pelapukan dari diskontinuitas (Tabel 2.5). Parameter ini sangat terpengaruh oleh keadaan iklim dan aktivitas manusia.

Tabel 2.5 Pembobotan pada berbagai kondisi diskontinuitas (Bieniawski, 1989)

<i>Parameter</i>	<i>Rating</i>				
<i>Discontinuity length (persistence/continuity)</i>	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
<i>Separation (aperture)</i>	<i>none</i>	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
<i>Roughness of discontinuity surface</i>	<i>Very rough</i>	<i>Rough</i>	<i>Slightly rough</i>	<i>Smooth</i>	<i>Slickensided</i>
	6	5	3	1	0
<i>Infillings (gouge)</i>	<i>Hard filling</i>			<i>Soft filling</i>	
	<i>None</i>	< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm
	6	4	2	2	0
<i>Weathering discontinuity surface</i>	<i>Unweathered</i>	<i>Slightly weathered</i>	<i>Moderately weathered</i>	<i>Highly weathered</i>	<i>Decomposed</i>
	6	5	3	1	0

➤ **Kondisi Aliran Air**

Kondisi air ini merupakan kenampakan ada atau tidaknya aliran air pada massa batuan. Aliran air dapat berupa lembab, basah, menetes, dan mengalir. Parameter ini memiliki pembobotan yang dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Pembobotan pada kondisi aliran air (Bieniawski, 1989)

<i>Groundwater condition</i>	<i>Rating</i>
<i>Completely dry</i>	15
<i>Damp</i>	10
<i>Wet</i>	7
<i>Dripping</i>	4
<i>Flowing</i>	0

➤ Orientasi Diskontinuitas

Orientasi dari diskontinuitas berpengaruh pada arah dari pembangunan terowongan. Orientasi dari diskontinuitas terhadap terowongan dapat berupa tegak lurus, paralel, atau tidak ada sama sekali. Arah dari *dip* dan *dip direction* dengan arah dari pembangunan terowongan dapat bersifat sangat baik, baik, sedang, tidak baik, dan sangat tidak baik seperti hasil nilai dari pembobotan berdasarkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Pembobotan pada kondisi pengaruh orientasi diskontinuitas (Bieniawski, 1989)

<i>Strike perpendicular to tunnel axis</i>		<i>Strike parallel to tunnel axis</i>		<i>Irrespective of strike</i>		
<i>Drive with dip</i>		<i>Drive against dip</i>				
Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip
45° – 90°	20° – 45°	45° – 90°	20° – 45°	20° – 45°	45° – 90°	0° – 20°
<i>Very favorable</i>	<i>Favorable</i>	<i>Fair</i>	<i>Unfavorable</i>	<i>Fair</i>	<i>Very unfavorable</i>	<i>Fair</i>
<i>Joint orientation assessment for</i>		<i>Very favorable</i>	<i>Favorable</i>	<i>Fair</i>	<i>Unfavorable</i>	<i>Very unfavorable</i>
<i>Tunnel</i>		0	-2	-5	-10	-12

2.3.1 Klasifikasi Berdasarkan Metode RMR

RMR merupakan hasil penjumlahan dari pembobotan keenam parameter di atas yang akan menghasilkan lima pengklasifikasian massa batuan, antara lain:

1. Massa batuan sangat baik dengan nilai total pembobotan 100 – 81;
2. Massa batuan baik dengan nilai total pembobotan 80 – 61;
3. Massa batuan sedang dengan nilai total pembobotan 60 – 41;
4. Massa batuan buruk dengan nilai total pembobotan 40 – 21;
5. Massa batuan sangat buruk dengan nilai total pembobotan < 20.

Hasil dari pengklasifikasian tersebut dapat digunakan sebagai estimasi beberapa parameter seperti pembangunan tanpa perkuatan, kohesi massa batuan, sudut geser dalam, modulus deformasi batuan massa batuan, metode ekskavasi, penentuan perkuatan, dan keamanan lereng. Parameter-parameter tersebut dapat digunakan sebagai studi kelayakan dan desain awal.

2.3.2 Sistem Perkuatan Berdasarkan Metode RMR

Jenis-jenis perkuatan yang dipakai, antara lain baut batuan (*rock bolt*), beton tembak (*shotcrete*), dan set baja (*steel set*). Pemberian perkuatan tersebut berdasarkan dari nilai

RMR total yang didapat. Nilai RMR total yang kecil akan membutuhkan lebih banyak perkuatan, sedangkan nilai RMR total yang besar memerlukan sedikit perkuatan (Tabel 2.8).

Tabel 2.8 Perkuatan terowongan berdasarkan nilai RMR (Bieniawski, 1989)

<i>Rock mass class</i>	<i>Excavation</i>	<i>Rock bolts</i>	<i>Shotcrete</i>	<i>Steel sets</i>
I – <i>Very good rock</i> RMR : 81-100	<i>Full face, 3 m advance</i>	<i>Generally no supports required except spot bolting</i>		
II – <i>Good rock</i> RMR : 61-80	<i>Full face, 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face</i>	<i>Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh</i>	<i>50 mm in crown where're required</i>	<i>none</i>
III – <i>Fair rock</i> RMR : 41-60	<i>Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.</i>	<i>Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.</i>	<i>50-100 mm in crown and 30 mm in sides.</i>	<i>none</i>
IV – <i>Poor rock</i> RMR : 21-40	<i>Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.</i>	<i>Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.</i>	<i>100-150 mm in crown and 100 mm in sides.</i>	<i>Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.</i>
V – <i>Very poor rock</i> RMR : <20	<i>Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.</i>	<i>Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.</i>	<i>150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.</i>	<i>Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.</i>

2.4 Metode Sistem Q

Klasifikasi Sistem Q diperkenalkan oleh Barton, dkk. (1974) di *Norwegian Geotechnical Institute* (NGI). Klasifikasi ini berdasarkan pendekatan dari 200 kasus pada terowongan. Metode ini berdasarkan pada tiga faktor utama, yaitu:

1. Ukuran blok batuan (RQD/J_n);
2. Kuat geser pada blok batuan utuh (J_r/J_a);
3. Tegangan aktif (J_w/SRF).

Ukuran blok batuan direpresentasikan dengan struktur pada massa batuan dan mengukur ukuran dari blok atau ukuran pembajian yang dibentuk oleh kehadiran kumpulan kekar. Nilai J_n merupakan banyaknya kekar yang ditemukan. Pengambilan nilai J_n bisa dari hasil pengeboran atau kamera pengeboran.

Kuat geser batuan direpresentasikan dengan kekasaran dan karakteristik dari kekar atau material pengisi. Nilai dari J_r/J_a didapat dari *critical* set kekar, set kekar yang sangat tidak baik untuk kestabilan dari blok batuan pada bagian atas.

Tegangan aktif merupakan faktor empiris yang mendeskripsikan keadaan tegangan aktif. SRF didapat berdasarkan tekanan yang hilang selama ekskavasi, tegangan batuan pada kompeten batuan, dan tekanan remasan (*squeezing*) pada batuan yang bersifat plastis. J_w didefinisikan sebagai pengaruh dari tekanan air yang dapat memiliki efek merugikan terhadap kuat geser dari kekar akibat dari pengurangan tegangan efektif normal.

Hasil dari nilai Q dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$Q = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF$$

Penjelasan lebih rinci dari enam parameter pada persamaan di atas, yaitu:

➤ *Rock Quality Designation* (RQD)

Nilai RQD adalah penentuan persentase kualitas massa batuan yang didasarkan dengan tingkat kerapatan dari diskontinuitas. Untuk mendapatkan nilai dari RQD bisa menggunakan hasil dari inti bor atau dengan cara pengamatan langsung pada massa batuan. Hasil dari nilai RQD akan memiliki nilai pembobotan yang dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Nilai RQD dari hasil pengeboran bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$RQD = \frac{\text{Jumlah panjang inti bor} > 10 \text{ cm}}{\text{Panjang total pengeboran}} \times 100\%$$

Sementara itu, nilai RQD dari hasil pengamatan massa batuan langsung dapat menggunakan persamaan:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0,1\lambda} \cdot (0,1\lambda + 1)$$

$$RQD = -3.68 \lambda + 110,4$$

λ = frekuensi diskontinuitas

Tabel 2.9 Klasifikasi RQD (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

Condition	RQD
<i>Very poor</i>	0 – 25
<i>poor</i>	25 – 50
<i>Fair</i>	50 – 75
<i>Good</i>	75 – 90
<i>Excellent</i>	90 – 100

➤ Jumlah Set Diskontinuitas (J_n)

Parameter ini merepresentasikan jumlah dari set diskontinuitas seperti foliasi, sekistose, belahan, *shear* atau perlapisan. Jika terdapat banyak kekar maka dihitung sebagai set diskontinuitas yang dapat dilihat dari *stereonet*. Jika sedikit diskontinuitas yang terlihat maka dihitung sebagai set diskontinuitas acak. Jumlah set diskontinuitas diberikan pembobotan seperti pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Jumlah set dari diskontinuitas dan nilai pembobotan (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

Condition	J_n
<i>Massive, no or few joints</i>	0.5 – 1.0
<i>One joint set</i>	2
<i>One joint set plus random</i>	3
<i>Two joint sets</i>	4
<i>Two joint sets plus random</i>	6
<i>Three joint sets</i>	9
<i>Three joint sets plus random</i>	12
<i>Four or more joint sets, random, heavily jointed, "sugar cube," etc.</i>	15
<i>Crushed rock, earth-like</i>	20

➤ Kekasaran Bidang Diskontinuitas (J_r)

Parameter ini dinilai berdasarkan tingkat kekasaran dan kegelombangan dari diskontinuitas. Penilaian tingkat kekasaran dari diskontinuitas, seperti kasar, halus dan *slickensided*, serta kegelombangan dilihat dari bergelombang, datar, atau bertangga. Nilai dari parameter ini dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Tingkat kekasaran dan kegelombangan diskontinuitas (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

<i>Condition</i>	J_r
<i>Rock wall contact and</i>	
<i>Rock wall contact before 10 cm shear</i>	
<i>Discontinuous joint</i>	4
<i>Rough or irregular, undulating</i>	3
<i>Smooth, undulating</i>	2
<i>Slickensided, undulating</i>	1.5
<i>Rough or irregular, planar</i>	1.5
<i>Smooth, planar</i>	1
<i>Slickensided, planar</i>	0.5
<i>No rock wall contact when sheared</i>	
<i>Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact</i>	1
<i>Sandy, gravelly, or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact</i>	

➤ Alterasi Bidang Diskontinuitas (J_a)

Alterasi pada diskontinuitas menggambarkan tingkat perubahan pada diskontinuitas akibat adanya pengaruh air yang membawa mineral atau pengaruh sifat alterasi pada diskontinuitas. Faktor ini dipengaruhi oleh tingkat bukaan, jenis dan kekuatan dari isian, dan ketebalan dari isian, selengkapnya bisa dilihat pada Tabel 2.12.

➤ Faktor Pengaruh Aliran Air Pada Diskontinuitas (J_w)

Parameter ini didapat berdasarkan pengaruh dari tekanan air, yang berefek kepada kuat geser dari diskontinuitas. Hal ini mengakibatkan pengurangan dari tegangan normal efektif pada diskontinuitas. Terdapatnya air dapat menghasilkan *softening* dan berkemungkinan *wash-out* pada kasus diskontinuitas yang terisi mineral lempung. Nilai dari J_w dapat menggambarkan pengaruh kondisi airtanah terhadap erosi atau pencucian (*leaching*) dan tercantum pada Tabel 2.13.

Tabel 2.12 Kondisi alterasi atau ubahan pada massa batuan dan nilai pembobotan (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

Condition	ϕ_r approx. (Degree)	J_a
<i>Rock wall contact (no mineral filling, only coating)</i>		
<i>Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote</i>		0.75
<i>Unaltered joint walls, surface staining only</i>	25 – 35	1
<i>Slightly altered joint walls; non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.</i>	25 – 30	2
<i>Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening)</i>	20 – 25	3
<i>Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite and mica; also chlorite, talc, gypsum, and graphite, etc., and small quantities of swelling clays (discontinuous coatings, 1–2 mm or less in thickness).</i>	8 – 16	4
<i>Rock wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)</i>		
<i>Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.</i>	25 – 30	14
<i>Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous, <5 mm in thickness)</i>	16 – 24	6
<i>Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, <5 mm in thickness)</i>	12 – 16	8
<i>Swelling clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, <5 mm in thickness); value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles, and access to water, etc.</i>	6 – 12	8 – 12
<i>No rock wall contact when sheared (thin mineral fillings)</i>		
<i>Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay</i>	6 – 24	6,8, atau 8 – 12
<i>Zones or bands of silty or sandy clay, small clay fraction (non-softening)</i>	-	5
<i>Thick, continuous zones or bands of clay</i>	6 – 24	10, 13, 13 – 20

Tabel 2.13 Kondisi pengaruh aliran air pada massa batuan dan nilai pembobotan (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

Condition	Approx. water pressure (MPa)	J_w
<i>Dry excavation or minor inflow, i.e., 5 lt./min locally</i>	<0.1	1
<i>Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings</i>	0.1 – 0.25	0.66
<i>Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints</i>	0.25 – 1.0	0.5
<i>Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings</i>	0.25 – 1.0	0.33
<i>Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time</i>	> 1.0	0.2 – 0.1
<i>Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay</i>	> 1.0	0.1 – 0.05

➤ Faktor Pengurangan Tegangan (SRF)

Parameter ini dapat mengukur tekanan yang hilang selama ekskavasi pada massa batuan, tegangan batuan q_c/σ_1 pada massa batuan dengan q_c adalah kuat tekan uniaksial (UCS) dari material batuan dan σ_1 adalah tegangan terbesar sebelum ekskavasi dan tekanan dari peremasan (*squeezing*) atau pengembangan (*swelling*) pada massa batuan. Nilai dari SRF dapat ditetapkan dari *overburden* dan kenampakan topografi atau diambil secara umum dari geologi regional dan kondisi geologi. Kondisi dan pembobotannya dapat dilihat pada Tabel 2.14.

2.4.1 Klasifikasi Massa Batuan Sistem Q

Klasifikasi massa batuan dengan metode ini memiliki nilai yang sangat variatif, mulai dari 0,001 sampai 1000 dengan kelas dari *extremely poor* sampai *extremely good*. Setiap nilai dari Sistem Q mencirikan desain perkuatan yang digunakan. Desain perkuatan yang digunakan berdasarkan hasil dari Sistem Q, berupa beton tembak fiber, baut batuan, hingga rusuk baja. Jenis perkuatan inilah yang menyebabkan metode Sistem Q sangat direkomendasikan untuk terowongan dengan bagian atas berbentuk parabola. Nilai dari Q dikategorikan menjadi tiga grup dengan sembilan klasifikasi massa batuan dari Q_{\min} sampai Q_{\max} , sehingga kualitas massa batuan rata-rata dari $(Q_{\max} \times Q_{\min})^{1/2}$ yang diasumsikan sebagai kalkulasi di desain (Tabel 2.15).

2.4.2 Sistem Perkuatan Berdasarkan Sistem Q

Perkuatan menurut metode ini berdasarkan kelas massa batuan dan dimensi ekuivalen atau besaran yang diperoleh ketika terowongan tersebut dapat menyangga massa batuan sendiri. Nilai dari dimensi ekuivalen diperoleh dengan membagi panjang span atau tinggi terowongan dalam meter dengan nilai rasio perkuatan ekskavasi (ESR). Nilai ESR diambil berdasarkan fungsi dari terowongan yang akan dibangun (Tabel 2.16). Sementara itu, untuk mengetahui ukuran dari baut batuan dan *anchor* yang digunakan dapat dianalisis berdasarkan nilai rasio perkuatan ekskavasi, tinggi, dan lebar terowongan dengan menggunakan persamaan:

$$l_b = 2 + (0.15 B \text{ atau } H/ESR)$$

$$\text{Pada mahkota, } l_a = 0.4 B/ESR$$

$$\text{Pada dinding, } l_a = 0.35 H/ESR$$

Tabel 2.14 Parameter nilai dari SRF (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

Condition		SRF		
<i>Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated</i>				
<i>Multiple occurrences of weakness zone containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)</i>		10		
<i>Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation ≤ 50 m)</i>		5		
<i>Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m)</i>		2.5		
<i>Multiple-shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)</i>		7.5		
<i>Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation ≤ 50 m)</i>		5		
<i>Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation > 50 m)</i>		2.5		
<i>Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated</i>				
<i>Loose, open joints, heavily jointed or "sugar cube," etc. (any depth)</i>		5		
<i>Competent rock, rock stress problems</i>				
	qc/σ_1	σ_1/qc	SRF (old)	SRF (new)
<i>Low stress, near surface, open joints</i>	>200	<0.01	2.5	2.5
<i>Medium stress, favorable stress condition</i>	200 - 10	0.01-0.3	1	1
<i>High stress, very tight structure. Usually favorable to stability, may be unfavorable to wall stability</i>	10 - 5	0.3-0.4	0.5-0.2	2-5
<i>Moderate spalling and/or slabbing after > 1 hour in massive rock</i>	5 - 3	0.5-0.65	5-9	5-50
<i>Spalling or rock burst after a few minutes in massive rock</i>	3 - 2	0.65 - 1	9-15	50-200
<i>Heavy rock burst and immediate dynamic deformation in massive rock</i>	< 2	> 1	15-20	200-400
<i>Squeezing rock: plastic deformation in incompetent rock under the influence of high pressure</i>				
<i>Mild squeezing rock pressure</i>			1-5	5-10
<i>Heavy squeezing rock pressure</i>			>5	10-20
<i>Swelling rock: chemical swelling activity depending on the presence of water</i>				
<i>Mild swelling rock pressure</i>			5-10	
<i>Heavy swelling rock pressure</i>			10-15	

Tabel 2.15 Klasifikasi massa batuan Sistem Q (Barton, 1974 dalam Singh dan Goel, 2011)

Q	Group	Classification
0.001 – 0.01	3	<i>Exceptionally poor</i>
0.01 – 0.1		<i>Extremely poor</i>
0.1 – 1		<i>Very poor</i>
1 – 4	2	<i>Poor</i>
4 – 10		<i>Fair</i>
10 – 40		<i>Good</i>
40 – 100	1	<i>Very good</i>
100 – 400		<i>Extremely good</i>
400 – 1000		<i>Exceptionally good</i>

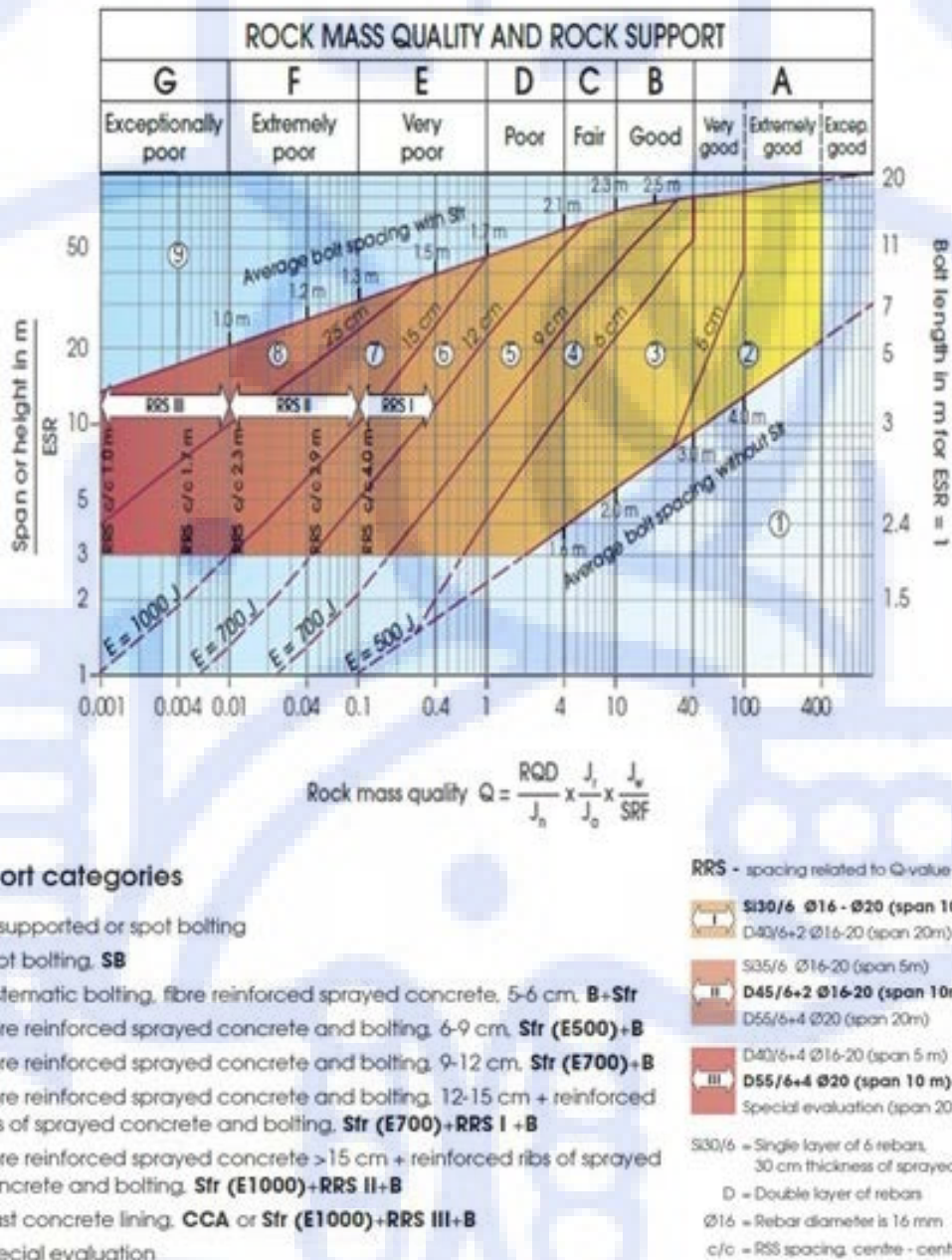
Tabel 2.16 Nilai ESR berdasarkan fungsi terowongan (Barton, 2008 dalam Singh dan Goel, 2011)

Type of excavation	ESR
<i>Temporary mine openings, etc.</i>	2 – 5
<i>Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (excluding high pressure penstocks), pilot tunnels, drifts and headings for large openings, surge chambers</i>	1.6 – 2.0
<i>Storage caverns, water treatment plants, minor road and railway tunnels, access tunnels</i>	1.2 – 1.3
<i>Power stations, major road and railway tunnels, civil defense chambers, portals, intersections</i>	0.9 – 1.1
<i>Underground nuclear power stations, railway stations, sports and public facilities, factories, major gas pipeline tunnels</i>	0.5 – 0.8

Berdasarkan Gambar 2.4 terdapat sembilan poin perkuatan. Poin-poin tersebut dalam NGI (2015) mengartikan:

- Poin 1, tidak dilakukan perkuatan;
- Poin 2, baut setempat SB;
- Poin 3, sistematis baut batu, perkuatan fiber beton tembak ketebalan 5-6 cm, B+Sfr;
- Poin 4, perkuatan fiber beton tembak ketebalan 6-9 cm dan baut, SFr (E500)+B;
- Poin 5, perkuatan fiber beton tembak ketebalan 9-12 cm dan baut, SFr (E700)+B;
- Poin 6, perkuatan fiber beton tembak ketebalan 12-15 cm ditambah *ribs* dengan beton tembak dan baut, SFr (E700)+RRS I +B;

- Poin 7, perkuatan fiber beton tembak dengan ketebalan >15 cm ditambah *ribs* dengan beton tembak dan baut, SFr (E1000)+RRS II+B;
- Poin 8, *cast concrete lining*, CCA atau SFr (E1000)+RRS III+B;
- Poin 9, perkuatan berupa lapisan beton terpadu atau dengan penambahan serat sebagai campuran perkuatan pada beton tembak setebal lebih dari 15 cm, penambahan perkuatan *ribs* dengan beton tembak dan baut, SFr (E1000)+RRS III+B.



Gambar 2.4 Grafik klasifikasi massa batuan dan penentuan perkuatan dengan Sistem Q (NGI, 2015)