

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Metoda Rancangan Terowongan

Konsep rancangan terowongan bawah tanah merupakan suatu hal yang relatif baru. Salah satu alasan tersebut adalah persoalan rancangan tambang bawah tanah (terowongan) yang berbeda dengan rancangan sebuah struktur bangunan konvensional, seperti bangunan jembatan atau gedung. Sebuah filosofi rancangan yang baik dikemukakan oleh E. Hoek yaitu "Tujuan dari sebuah rancangan untuk di penggalian bawah tanah harus menggunakan batuan itu sendiri sebagai material struktur yang utama, sehingga menghasilkan gangguan yang sekecil mungkin selama penggalian dan sesedikit mungkin penggunaan beton dan penyangga baja".

Menurut Bieniawski (1984), metode rancangan untuk menilai kestabilan bawah tanah dapat dikategorikan menjadi tiga bagian. Ketiga metoda tersebut antara lain adalah yaitu :

1. Metoda Analitik (*Analytical Method*)

Metode analitik atau *analytical method* yaitu metode yang digunakan untuk menganalisis tegangan dan deformasi di sekitar terowongan. Teknik-teknik yang digunakan untuk metoda ini yaitu sebagai berikut :

- Perhitungan numerik seperti metode elemen hingga (*finite element method* / FEM), metode beda hingga (*limite element method* / LEM), dan metode elemen batas (*boundary element method* / BEM).
- Simulasi analogi seperti analogi listrik dan foto elastik.
- Model fisik (*physical modeling*) seperti penggunaan maket.

## 2. Metoda Observasi / Pengamatan (*Observational Method*)

Analisa yang digunakan pada metoda ini yaitu berdasarkan data pemantauan pergerakan massa batuan saat penggalian. Hal tersebut dilakukan untuk mengamati ketidakstabilan dan analisa interaksi penyanggaan terhadap massa batuan. Klasifikasi massa batuan yang termasuk kedalam metode ini diantaranya mencakup NATM (*New Austrian Tunneling Method*) dan *Convergence Confinement Method*, walaupun dianggap sebagai metode terpisah, pendekatan observasi hanya suatu jalan untuk memeriksa ulang.

## 3. Metoda Empirik (*Empirical Method*)

Metode empirik memperkirakan stabilitas sebuah tambang bawah tanah dan terowongan dengan menggunakan analisis statistik pengamatan bawah tanah. Metode ini dilakukan pendekatan berdasarkan pengalaman yang didapat dari beberapa pekerjaan, (Hoek & Brown, 1980, Goodman, 1980).

Saat ini dikenal klasifikasi batuan dari Terzaghi, Bieniawski dan NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*) yang terdiri dari *rock load classification method*, *stand-up time classification*, RQD (*Rock Quality Designation Index*), RSR (*Rock Structure Rating*), RMR (*Rock Mass Rating*), Q – *system*, *size strength classification*, dan *ISRM classification*.

### 3.2 Parameter Geomekanika Batuan

Dalam mempelajari aspek kekuatan batuan (mekanika batuan, geomekanika dan lain sebagainya) diperlukan klasifikasi geomekanik. Tujuannya klasifikasi tersebut yaitu sebagai alat komunikasi para ahli dalam permasalahan geomekanika, memperkirakan sifat-sifat massa batuan, dan juga merencanakan atau menilai kemantapan terowongan dan lereng (Hirawan, R.F., dan Zakaria, 2002).

Sifat-sifat batuan yang penting dalam melakukan pengamatan terhadap terowongan sebagai parameter geomekanika batuan sehingga dapat menentukan perhitungan stabilitasnya antara lain :

- Sifat fisik material

Kekerasan terhadap goresan, kekerasan terhadap pukulan/tekanan, kekerasan terhadap kikisan, bobot isi batuan, porositas, permeabilitas.

- Sifat mekanis material

Kuat tekan, kuat tarik, sudut geser dalam, kohesi dan lain sebagainya.

### **3.3 Klasifikasi Massa Batuan dengan *Rock Mass Rating***

Klasifikasi massa batuan digunakan sebagai parameter penting dalam perancangan model terowongan. Namun, klasifikasi massa batuan tidak digunakan sebagai pengganti untuk rancangan rekayasa, tetapi harus digunakan bersama-sama dengan metode lainnya, seperti metode analitik dan metode observasi. Hal tersebut agar dapat diperoleh hasil rancangan yang komprehensif yang sesuai dengan tujuan rancangan dan kondisi geologi di lapangan.

Menurut Bieniawski (1984), pada hakekatnya suatu klasifikasi massa batuan dibuat untuk memenuhi hal-hal berikut ini, yaitu :

- Mengelompokkan massa batuan tertentu pada kelompok yang mempunyai perilaku yang sama, tetapi memiliki kelas dengan kualitas yang berbeda.
- Lebih mudah dalam memahami karakteristik dari masing - masing kelompok massa batuan
- Melengkapi cara dalam berkomunikasi tentang klasifikasi massa batuan dengan para ilmuwan terutama para ahli geoteknik dan geologi.
- Menghasilkan data kuantitatif sebagai pedoman dalam melakukan rancangan terowongan.

Kriteria analisis kestabilan terowongan dapat dinyatakan dalam bentuk grafik hubungan antara RMR (*Rock Mass Rating*) terhadap *span design*. Penerapannya, massa batuan dibagi menjadi seksi- seksi, dan masing-masing seksi diklasifikasikan secara terpisah. Dalam beberapa kasus, perubahan signifikan dalam spasi atau karakteristik bidang diskontinyu dalam batuan yang sama mungkin menyebabkan massa batuan dibagi juga menjadi seksi-seksi yang lebih kecil berdasarkan struktur geologinya. Di bawah ini terdapat 6 (enam) parameter RMR dalam menentukan klasifikasi massa batuan yang dihitung berdasarkan bobot kondisinya.

#### 3.4.1 Kuat Tekan Batuan Utuh (*Strength of Intact Rock Material*)

Pengujian kuat tekan batuan (*uniaxial compressive strength / USC*) dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat tekan batuan utuh. Harga tegangan pada saat contoh batuan hancur didefinisikan sebagai kuat tekan uniaksial batuan, berikut adalah persamaan rumusnya :

$$\sigma_c = F / A \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

$\sigma_c$  = Kuat tekan batuan (MPa)

F = Gaya yang bekerja pada saat contoh batuan hancur (kN)

A = Luas penampang yang tegak lurus arah gaya (mm<sup>2</sup>)



Foto 3.1  
Uji Kuat Tekan Batuan Utuh

Bieniawski (1989) mengemukakan penentuan kuat tekan batuan utuh dapat dilakukan dengan menggunakan pukulan palu geologi dan/atau pisau lipat pada batuan, kemudian dibandingkan dengan nilai kuat tekan batuan secara teori dari hasil uji sifat mekanik PLI (*point load index*) dan/atau UCS. Hal tersebut merupakan suatu pendekatan penentuan kuat tekan batuan utuh selain dengan menggunakan UCS *test* di laboratorium. Tabel bobot parameter uji lapangan kuat tekan batuan dapat dilihat di bawah ini.

**Tabel 3.1**  
**Nilai Parameter Uji Kuat Tekan Batuan**

No	Teori Uji Laboratorium		Uji Lapangan	Bobot
	PLI (MPa)	UCS (MPa)		
1	>10	>250	Batuan tidak dapat ditempa dengan palu	15
2	4 – 10	100 – 250	Dibutuhkan berkali-kali pukulan palu	12
3	2 – 4	50 – 100	Dibutuhkan lebih dari satu pukulan palu	7
4	1 – 2	25 – 50	Dapat dipecahkan oleh satu pukulan palu	4
5	-	5 – 25	Dapat dipatahkan oleh ujung palu	2
6	-	1 – 5	Dapat dikupas oleh pisau lipat	1
7	-	<1	Dapat dipatahkan oleh ibu jari tangan	0

Sumber : Bieniawski, 1989.

### 3.4.2 Rock Quality Designation (RQD)

Sebuah informasi untuk memperkirakan kualitas dari massa batuan secara kuantitatif disebut sebagai RQD (*Rock Quality Designation*). RQD diperkenalkan pertama kali oleh Deere (1966).

#### 1. Metoda Tidak Langsung

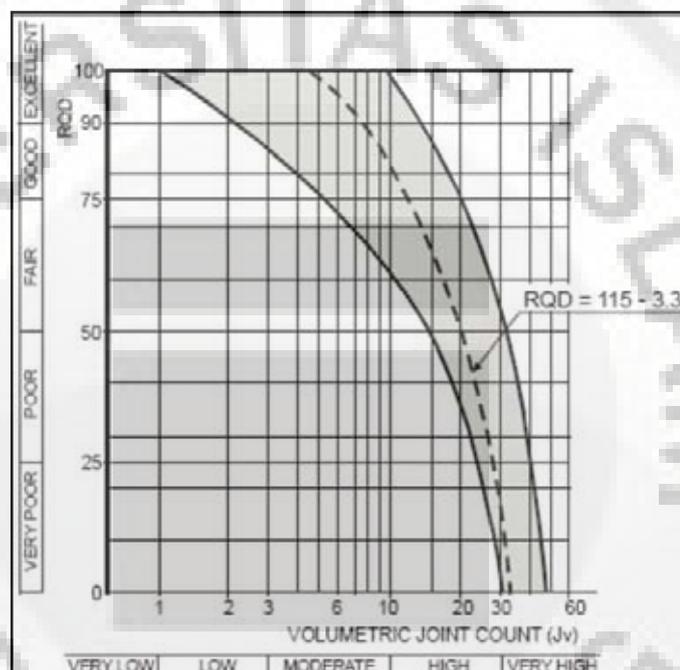
RQD yang digunakan pada metode tidak langsung terdapat dua cara, yakni dengan mengukur struktur setiap meter persegi yang dikemukakan oleh Priest dan Hudson (1983), dan mengukur struktur setiap meter kubik yang dikemukakan oleh Palstrom (1982). Berikut adalah persamaan rumus yang dikemukakan oleh Priest dan Hudson (1983).

$$\text{RQD} = 100 (0,1 \lambda + 1) e^{-0,1\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

$\lambda$  adalah perbandingan antara jumlah kekar dengan panjang *scan line* (kekar/meter), sedangkan rumus yang dikemukakan Palstrom (1982) adalah sebagai berikut :

$$\text{RQD} = 115 - 3,3 \text{ Jv} \dots\dots\dots (3)$$

Jv adalah jumlah total (banyaknya) kekar dalam satu meter kubik. Hubungan antara RQD dan Jv dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Sumber : Palstrom, 1982

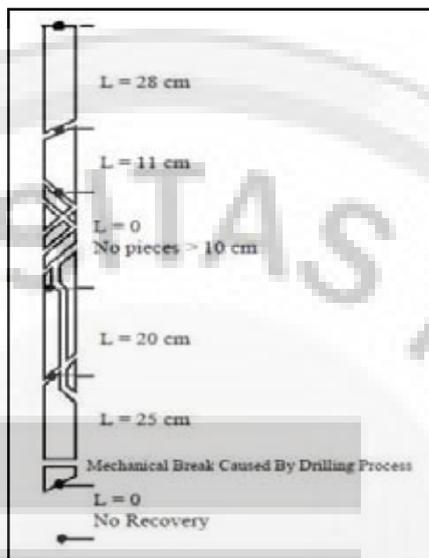
**Grafik 3.1**  
Hubungan RQD dan Jv

## 2. Metoda Langsung

RQD dapat dihitung dengan menggunakan metoda langsung, yaitu dengan menggunakan *core logs*. Menurut Deere, cara untuk menghitungnya diilustrasikan pada Gambar 3.1. Berdasarkan pengalamannya, semua ukuran inti bor dan tekniknya dapat digunakan dalam perhitungan RQD selama tidak menyebabkan inti bor tersebut pecah (deere D. U. And Deere D. W., 1988). Menurut Deere (1966), rekomendasi lebih kecil dari 1,5 m.

$$\text{RQD} = \frac{\sum \text{Panjang Inti Bor} > 10 \text{ cm}}{\text{Total Panjang Inti Bor}} \times 100 \% \dots\dots\dots (4)$$

Persamaan di atas merupakan rumus untuk menghitung RQD dengan panjang total pemboran mencapai 1 meter (100 cm), sehingga RQD diambil dari panjang inti yang lebih dari 10 persennya ( $\geq 10$  cm).

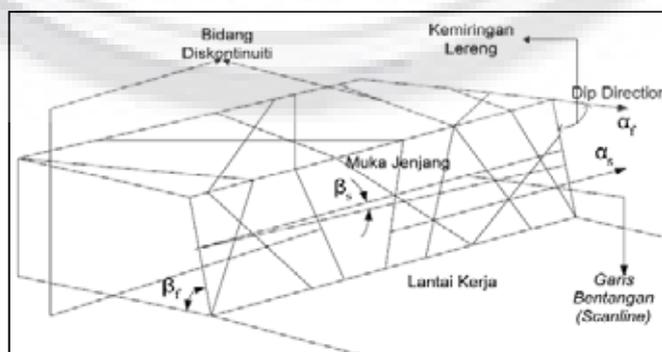


Sumber : Deere, 1966

**Gambar 3.1**  
Pengukuran RQD dengan Metoda Langsung

### 3.4.3 Spasi Ketidakmenerusan (*Spacing of Discontinuities*)

Rekahan (kekar) cenderung akan memperburuk kekuatannya, karena sebagai salah satu bidang diskontinyu (ketidakmenerusan). Karakteristik mekanik massa batuan bergantung pada jarak serta orientasinya. Spasi bidang diskontinyu adalah jarak tegak lurus antara bidang-bidang diskontinyuitas yang berarah sama dan berurutan sepanjang garis pengukuran, berikut ilustrasi gambarnya.



Sumber : Bieniawski, 1989

**Gambar 3.2**  
Spasi Ketidakmenerusan

### 3.4.4 Kondisi Ketidakmenerusan (*Condition of Discontinuities*)

Kondisi ketidakmenerusan merupakan parameter yang sangat kompleks dan terdiri dari sub-sub parameter seperti kemenerusan bidang (*persistence*), kekasaran permukaan (*roughness*), material pengisi (*filling*), pelapukan (*weathered*), dan jarak antar kekar.

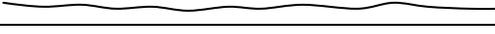
#### 1. Panjang Ketidakmenerusan (*Persistence*)

Panjang ketidakmenerusan atau *persistence* adalah kemenerusan bidang diskontinuitas yang memanjang. Penentuan kemenerusan bidang diskontinuitas di lapangan masih bersifat kasar. Hal tersebut dikarenakan pengamatan panjang ketidakmenerusan terbatas dari luas bidang yang terlihat. Semakin besar panjang ketidakmenerusan, maka bidang diskontinuitas semakin besar dan bobotnya akan semakin kecil.

#### 2. Kekasaran Permukaan Ketidakmenerusan (*Roughness*)

Kekasaran permukaan merupakan suatu parameter yang dapat menilai penguncian pada suatu permukaan ketidakmenerusan. Jika permukaan bersih dan rapat maka dapat mencegah terjadinya geseran di sepanjang permukaan ketidakmenerusan. Klasifikasi kekasaran yaitu sangat kasar, kasar, agak kasar, halus, dan licin.

**Tabel 3.2**  
**Kekasaran Permukaan Bidang Ketidakmenerusan**

Jenis Kekasaran	Profil Permukaan Bidang Diskontinuitas
Kasar (tak beraturan), berundak	
Halus, berundak	
Gores garis, berundak	
Kasar (tak beraturan), bergelombang	
Halus, bergelombang	
Gores garis, bergelombang	
Kasar (tak beraturan), datar	
Halus, datar	
Gores garis, datar	

Sumber : Anonim, 1978

3. Bukaan Ketidakmenerusan (*Aperature*)

Pengambilan data untuk parameter ini dilakukan berdasarkan pengamatan secara kasat mata, yaitu dengan melihat lebar bukaan (rekahan) di setiap dinding terowongan.

4. Kondisi Isian (*Infilling*)

Parameter ini mempengaruhi stabilitas bidang ketidakmenerusan karena faktor ketebalannya. Konsisten atau tidaknya, dan sifat pengembangan bila terkena air akan dapat menyebabkan bidang diskontinyu (isian) menjadi lemah.

5. Pelapukan (*Weathering*)

Pelapukan dinding batuan ialah ketidakmenerusan permukaan yang terbentuk pada batuan. Berikut merupakan parameternya :

- Tidak lapuk (*unweathered*), jenis batuan ini terlihat segar, artinya tidak ada terlihat tanda-tandanya pelapukan.
- Pelapukan ringan (*slightly weathered rock*), batuan terlihat luntur. Lunturan masih ditemukan dengan kedalaman dari permukaan sebesar 20% dari spasi ketidakmenerusan.
- Pelapukan sedang (*moderately weathered rock*) yaitu pada kondisi batuan dengan kedalaman lunturan dari permukaan lebih besar dari 20% spasi ketidakmenerusan.
- Pelapukan kuat (*highly weathered rock*) yaitu batuan dengan lunturan meliputi seluruh batuan dan terdapat bagian material yang gembur. Tekstur asli batuan tetap terjaga, tetapi ditemukan pemisahan butiran.
- Sangat lapuk (*completely weathered rock*) yaitu untuk batuan luntur, terdekomposisi seluruhnya, batuan dalam kondisi gembur.

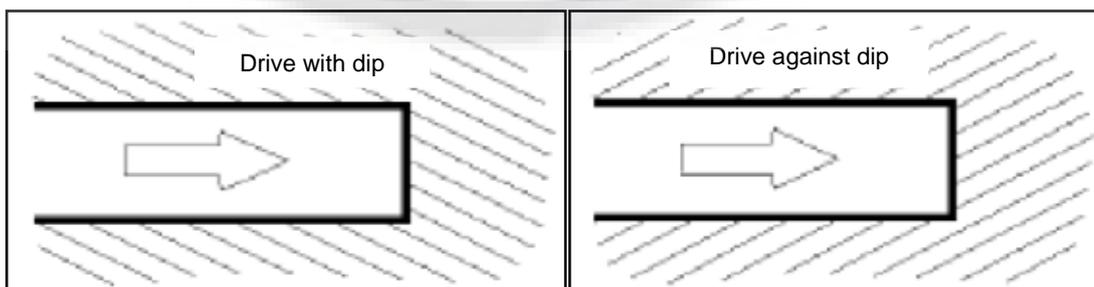
### 3.4.5 Kondisi Air Tanah (*Ground Water Condition*)

Kondisi air tanah atau debit aliran air tanah akan sangat mempengaruhi kekuatan massa batuan. Oleh sebab itu, perlu diperhitungkan dalam klasifikasi massa batuan. Kondisi air tanah ditentukan dengan mengamati atap dan dinding terowongan secara visual, kemudian dinyatakan dengan parameter umum seperti kering, lembab, air menetes atau mengalir.

### 3.4.6 Orientasi Ketidakmenerusan (*Orientation of Discontinuities*)

Kekar (*joint*) adalah rekahan-rekahan pada batuan yang berbentuk lurus, planar, dan tidak terjadi pergeseran. Pasangan kekar (*joint set*) adalah kumpulan kekar pada suatu batuan yang memiliki ciri khas yang dapat dibedakan dengan pasangan kekar lainnya, (Bieniawski, 1984).

Terkadang beberapa kekar saling berpotongan, membagi sebuah batuan besar menjadi balok-balok yang saling terpisah. Jika terowongan menembus bidang lemah seperti kekar dengan arah sejajar terowongannya dan kemiringan curam, serta kemiringan bidang yang berlawanan dengan arah kemajuan dan kemiringan yang curam maka hal tersebut akan sangat merugikan kestabilan terowongan dan menyebabkan ambrukan. Jika arah terowongan searah dengan arah kemiringan struktur maka disebut *drive with dip*, dan jika arah terowongan berlawanan dengan arah kemiringan struktur maka disebut *drive against dip*. Gambar 3.3 merupakan gambaran kedudukan arah kemiringan struktur terhadap arah terowongannya.



Sumber : Bieniawski, 1984.

**Gambar 3.3**  
Keadaan Bidang Lemah terhadap Arah Terowongan

Tabel di bawah ini merupakan ringkasan dari 6 parameter penentuan klasifikasi massa batuan dengan metoda RMR. Tentunya tabel tersebut berfungsi untuk mendapatkan nilai kondisi massa batuan dan penentuan kelas massa batuan dalam menurut Z. T Bieniewski (1979).

**Tabel 3.3**  
**Parameter Klasifikasi Massa Batuan dengan Metoda Rock Mass Rating**

Parameter			Selang Nilai						
1	Kuat Tekan Batuan Utuh	PLI (Mpa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Kuat Tekan Rendah Perlu UCS		
		UCS (Mpa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5-25	1-5	< 1
	Bobot	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	>25			
	Bobot	20	17	13	8	3			
3	Spasi Diskontinuitas (m)		>2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,06		
	Bobot		20	15	10	8	5		
	Kondisi Bidang	Panjang	<1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m		
		Bobot	6	4	2	1	0		
	Ketidakmenerusan	Bukaan	Tidak Ada	Sangat rapat	Sedang	Lebar	Sangat Lebar		
		Bobot	6	4	2	1	0		
		Kekasaran	Sangat Kasar	Kasar	Sedang	Halus	Licin		
		Bobot	6	4	2	1	0		
		Isian	Tidak Ada	Keras <5 mm	Keras >5 mm	Lunak <5 mm	Lunak >5 mm		
		Bobot	6	4	2	1	0		
	5	Orientasi Strike/Dip (Bid. Kemenerusan)		Strike Tegak Lurus dg Kemajuan	Drive dip (45 - 90)	Drive dip (20 - 45)	Drive again dip (45 - 90)	Drive again dip (20 - 45)	
				Bobot	0	-2	-5	-10	
				Strike Sejajar Dg Kemajuan	dip (45 - 90)	dip (20 - 45)	dip (0 - 20)		
Bobot		Sangat tidak Untung		Sedang	Sedang				
Bobot		-12		-5	-5				
6	Air Tanah pada Kekar	Aliran / 10 m Pjng Tunnel (lit/menit)	none	<10	10 - 25	25 - 125	>125		
		Tek air pd kekar / Maks. teg utama (kPa)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Kondisi umum		Kering	Lembab	Basah	Menetes	Mengalir		
	Bobot		15	10	7	4	0		

Sumber : Bieniewski, 1989

Menurut Bieniawski (1989), setelah mendapatkan nilai kondisi massa batuan dengan menggunakan perhitungan pada tabel di atas, selanjutnya menentukan kondisi massa batuan berdasarkan kelas.

**Tabel 3.4**  
**Kondisi Massa Batuan berdasarkan Klasifikasi *Rock Mass Rating***

Kelas Batuan	Bobot Batuan	Tipe Batuan	Properties	
			c (Kpa)	$\Phi$ (°)
I	81 – 100	Sangat Baik	> 400	> 45
II	61 – 80	Baik	300 – 400	35 – 45
III	41 – 60	Sedang	200 – 300	25 – 35
IV	21 – 40	Jelek	100 – 200	15 – 25
V	< 20	Sangat Jelek	< 100	< 15

Sumber : Bieniawski, 1989

### 3.5 Sistem Penyanggaan berdasarkan Klasifikasi *Rock Mass Rating*

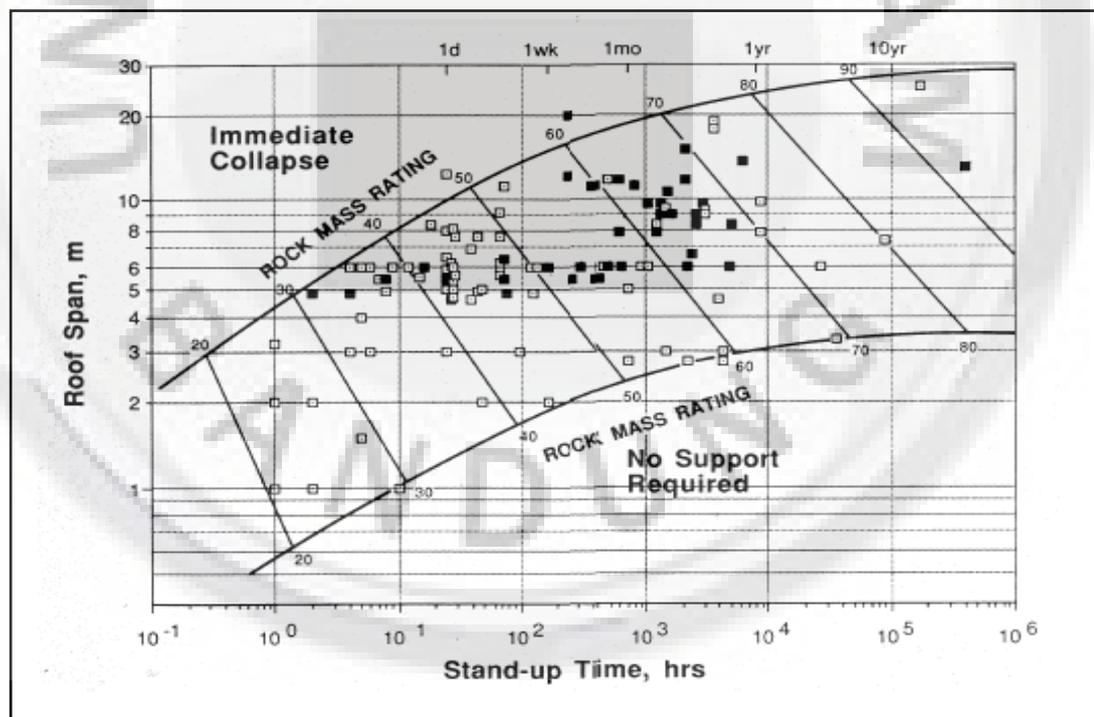
RMR dapat digunakan sebagai panduan memilih sistem penguatan atau penyangga terowongan. Panduan ini tergantung pada beberapa faktor seperti kedalaman terowongan dari permukaan, ukuran dan bentuk terowongan, serta metode penggalian yang dipakai (Bieniawski, 1989). Namun, kedalaman terowongan tidak akan begitu mempengaruhi, karena pada dasarnya semakin dalam terowongan maka tingkat kestabilannya akan semakin tinggi. Hal tersebut berlaku jika tidak dipengaruhi oleh keberadaan struktur geologi.

#### 3.5.1 Menentukan *Roof Span* dan *Stand Up Time*

Dalam penentuan kestabilan terowongan dapat ditentukan menggunakan *stand up time* dari nilai RMR menggunakan grafik span terhadap *stand up time* pada Gambar 3.2 (Bieniawski, 1989). Keakuratan dari *stand up time* ini menjadi diragukan karena nilai *stand up time* sangat dipengaruhi oleh metoda penggalian, ketahanan terhadap pelapukan, kondisi tegangan insitu yang merupakan parameter-parameter penting yang tidak tercakup dalam metoda RMR. Oleh karena itu, sebaiknya grafik ini hanya digunakan untuk tujuan perbandingan semata.

Menurut Laufer (1958), lebar terowongan tanpa penyanggaan (*roof span*) didefinisikan sebagai lebar bukaan atau jarak antara muka dan posisi terdekat dengan penyangga, jika jarak tersebut lebih panjang dari lebar terowongan. Selain *roof span*, terdapat waktu runtuh batuan (*stand-up time*) yang merupakan rentang waktu lamanya massa batuan di atap tidak runtuh (terowongan tetap stabil), baik tanpa pemasangan penyangga, setelah penyanggaan, maupun waktu pemasangan.

Penentuan *stand-up time* suatu massa batuan dapat dilakukan dengan memplot nilai RMR dan *span* pada grafik interpolasi *stand-up time* geomekanik. Bila garis ditarik vertikal dari titik perpotongan garis nilai RMR dan *span*, maka akan diperoleh *stand-up time* massa batuan. Berikut adalah grafik penentuan nilai *roof span* dan *stand up time*.



Sumber : Bieniawski, 1989.

**Grafik 3.2**  
Hubungan *Span* dengan *Stand Up Time* berdasarkan Nilai RMR

### 3.5.2 Rekomendasi Sistem Penyanggaan

Menurut Bieniawski (1989), rekomendasi sistem penyanggaan/penguatan massa batuan (*ground support recommendation/GSR*) dapat menentukan seberapa panjang terowongan yang aman tanpa disangga dengan waktu swasangganya. Selain itu, Bieniewski juga menentukan jenis, diameter, dan panjang dari baut batuan (*rockbolt*), jejaring besi (*steel set*), beton tembak (*shotcrete*), dan beton cor (*concrete*). Tabel 3.5 merupakan GSR berdasarkan kelas massa batuannya.

**Tabel 3.5**  
Rekomendasi Penyangga berdasarkan Klasifikasi *Rock Mass Rating*

Kelas Massa Batuan	Penggalian	Penyanggaan		
		<i>Rockbolt</i>	<i>Shotcrete</i>	<i>Steel sets</i>
Batuan amat baik (I) RMR : 81 - 100	<i>Full face</i> , kemajuan 3 m.	Umumnya, tidak diperlukan penyanggaan kec <i>spot bolting</i> .		
Batuan baik (II) RMR : 61 - 80	<i>Full face</i> , kemajuan 1 - 1.5 m, penyangga lengkap 20 m dari muka.	Secara lokal, <i>bolt</i> di atap panjang 3 m, spasi 2.5 m, dengan tambahan <i>wire mesh</i> .	50 mm di atap di tempat yang dibutuhkan.	Tidak perlu
Batuan sedang (III) RMR : 41 - 60	<i>Top heading and bench</i> , kemajuan 1.5- 3 meter di <i>top heading</i> , penyangga dipasang setiap setelah peledakan, penyangga lengkap 10 m dari muka.	Sistematik <i>bolt</i> panjang 4 m, spasi 1.5 - 2 m di atap dan dinding dengan <i>wire mesh</i> di atap.	50 - 100 mm di atap dan 30 mm di dinding.	Tidak perlu
Batuan buruk (IV) RMR : 21 - 40	<i>Top heading and bench</i> , kemajuan 1 - 1.5 meter di <i>top heading</i> , pemasangan penyangga seiring dengan penggalian, 10 m dari muka.	Sistematik <i>bolt</i> panjang 4 - 5 m, spasi 1 - 1.5 m di atap dan dinding dengan <i>wire mesh</i> .	100 - 150 mm di atap dan 100 mm di dinding.	Rangka ringan sampai sedang spasi 1.5 m di tempat yang diperlukan.
Batuan sangat buruk (V) RMR : < 20	<i>Drift</i> berganda dengan kemajuan 0.5 - 1.5 meter di <i>top heading</i> , pemasangan penyangga seiring dengan penggalian, <i>shotcrete</i> perlu segera setelah peledakan.	Sistematik <i>bolt</i> panjang 5 - 6 m, spasi 1 - 1.5 m di atap dan dinding dengan <i>wire mesh</i> , <i>bolt invert</i> .	150 - 200 mm di atap, 150 mm di dinding, dan 50 mm di muka.	Rangka berat sampai ringan spasi 0.75 m dengan <i>steel lagging</i> dan <i>forepoling</i> jika perlu, <i>close invert</i> .

Sumber : Bieniawski, 1989

### 3.5.3 Kekurangan dan Kelebihan Metoda *Rock Mass Rating*

Swart, A. H. (2004) memberikan penjelasan mengenai kekurangan dan kelebihan pengklasifikasian massa batuan dengan menggunakan metoda RMR berdasarkan pengalamannya, berikut adalah perbandingannya.

**Tabel 3.6**  
**Kelebihan dan Kekurangan Metoda *Rock Mass Rating***

No	Kelebihan	Kekurangan
1	Telah dikenal dan digunakan secara luas.	Sangat bergantung terhadap metode pengalihan yang dilakukan, rekomendasi penyangga hanya berlaku untuk bentuk terowongan tapal kuda dengan <i>span</i> maksimum 10 m dan kedalaman 900 m,
2	Adanya faktor koreksi terhadap orientasi kekar.	Faktor koreksi terhadap orientasi kekar merupakan kategori kasar dan sulit ditentukan tanpa pengalaman yang luas. Pada kondisi terburuk, orientasi kekar tidak dipertimbangkan untuk mendapatkan pengaruh yang dominan pada perilaku massa batuan.
3	Adanya faktor koreksi terhadap pengaruh air tanah	Nyatanya, beberapa kondisi kekar tidak dapat digambarkan secara akurat.
4	Kondisi kekar yang digambarkan meliputi kontinuitas, separasi, alterasi kekar, kekasaran dan isian	Nilai RQD ditentukan oleh persamaan yang diberikan oleh Palstrom. Persamaan ini menghasilkan nilai yang lebih besar daripada nilai RQD yang dihitung secara aktual.
5	Mudah menggabungkan parameter yang diukur yaitu RQD dan jarak antar kekar untuk menjelaskan frekuensi kekar ataupun ukuran blok.	Metoda ini memperhitungkan frekuensi kekar sebanyak dua kali yaitu melalui RQD dan jarak antar kekar. Sehingga metoda ini sangat sensitif terhadap perubahan dari spasi fraktur yang ada.
6	Kuat tekan uniaxial digunakan untuk menentukan kekuatan batuan intak. Nilai ini juga dapat dengan mudah diuji dengan point load langsung dilapangan.	Tidak memperhitungkan pengaruh dari tegangan terinduksi dalam perkiraan kestabilan terowongan.
7	Parameter-parameter penting batuan dapat ditentukan dari nilai RMR	Metoda RMR dikembangkan dari latar belakang teknik sipil yang berbeda dengan penggalian berbentuk lombong.
		Metoda RMR sangat tidak sensitif terhadap kuat tekan batuan intak yang merupakan faktor terpenting dalam perilaku teknik dari batuan (Pells, 2000)
		Metoda RMR tidak membedakan perbedaan <i>grade</i> dari material batuan yang dihadapi dengan baik (Pells, 2000)
		Keakuratan dari nilai <i>stand up time</i> yang diberikan oleh Bieniawski diragukan karena nilai ini bergantung pada metode penggalian yang digunakan, <i>durability</i> dan tegangan insitu yang merupakan parameter penting yang tidak tercakup dalam metoda RMR.
		Tidak memperhitungkan laju pada saat batuan segar melapuk ketika tersingkap di permukaan.
Keakuratan metoda ini masih diragukan, karena metoda ini menyamaratakan pada semua jenis batuan.		

Sumber : Swart, A. H., 2004

### 3.5.4 Estimasi Runtuhan

Menurut Unal (1983), tinggi runtuh ( $ht$ ) dan beban runtuh ( $P_{RMR}$ ) yang akan diterima penyangga dapat dihitung dengan menggunakan rumus persamaan.

Berikut adalah rumus perhitungannya :

- Tinggi runtuh ( $ht$ )

$$ht = \frac{100-RMR}{100} \times B \dots\dots\dots (5)$$

- Beban runtuh ( $P_{RMR}$ )

$$P_{RMR} = \frac{100-RMR}{100} \times B \times \rho = ht \times \rho \dots\dots\dots (6)$$

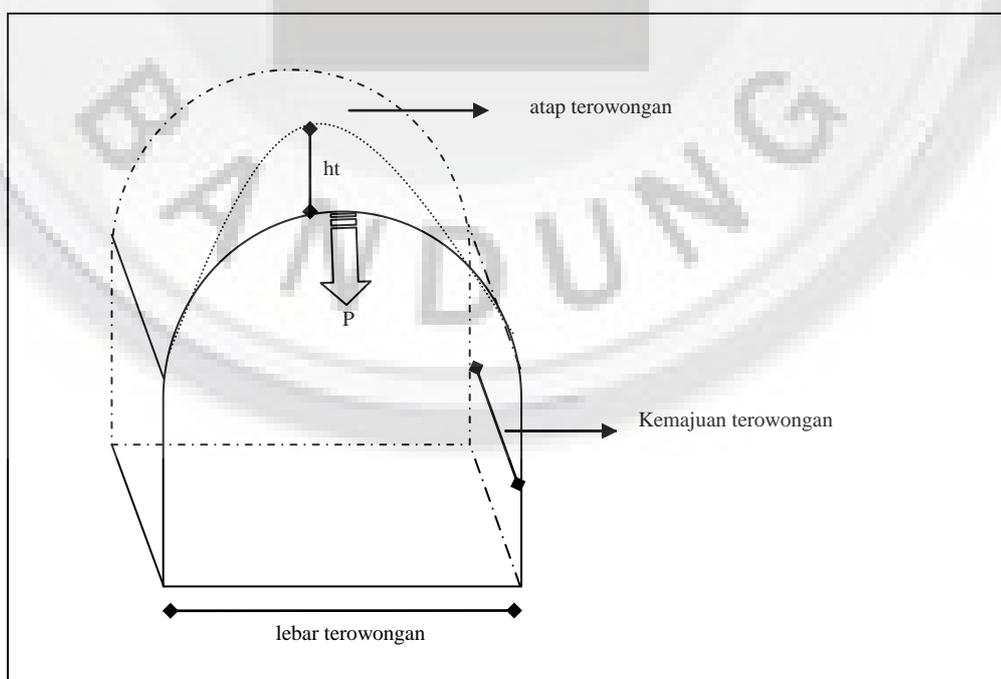
- Beban Luas Atap ( $W$ )

$$W = P \times B \times \text{kemajuan tambang} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan :

$B$  = Roof span (m)

$\rho$  = Massa jenis batuan ( $\text{kg/m}^3$ )

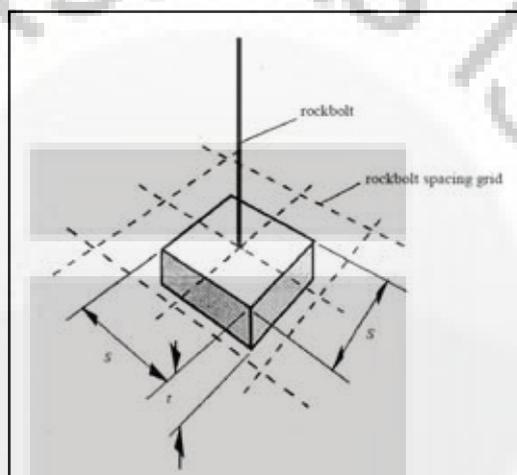


Sumber : Unal, 1983

**Gambar 3.4**  
Tinggi dan Beban Runtuhan Batuan

### 3.6 Analisis Kestabilan Terowongan

Cara umum untuk menentukan faktor keamanan (FK) lereng atau terowongan yaitu dengan menghitung dan menganalisis kestabilan terowongannya. Dalam tambang bawah tanah, FK ditentukan dengan menghitung perbandingan antara kekuatan beban untuk menahan dari suatu penguatan (penyanggaan) dengan beban batuan yang disanggaanya, sehingga gambar pembebanan pada baut batuan yang dapat dilihat di bawah ini (E. Hoek., dkk. 1980).



Sumber : E. Hoek, 1980

**Gambar 3.5**  
Penentuan FK dengan Beban Batuan dan Kapasitas Baut Batuan

Secara matematis FK terowongan dapat dinyatakan pada rumus di bawah ini. Dimana FK adalah faktor keamanan,  $\tau$  adalah beban penahan dari penguatan atau penyanggaan,  $\sigma$  atau  $w$  adalah beban batuan,  $n$  adalah banyaknya baut batuan yang digunakan, dan  $c$  adalah kapasitas kuat tarik baut batuan.

$$FK = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{n \times c}{w} \dots \dots \dots (8)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, maka pada keadaan :

- $F > 1,0$  lereng atau terowongan dalam keadaan aman
- $F = 1,0$  lereng atau terowongan kritis (kemungkinan ambruk)
- $F < 1,0$  lereng atau terowongan dalam keadaan tidak aman

Selain parameter sifat fisik dan mekanik penguatan, dalam proses perhitungan dan menganalisis kestabilan terowongan diperlukan parameter sifat fisik dan mekanik batuan. Parameter sifat fisik dan sifat mekanik batuan yang digunakan seperti kohesi ( $c$ ), sudut geser dalam ( $\theta$ ), *poision ratio* ( $\nu$ ), massa jenis ( $\rho$ ), modulus young ( $E$ ), kuat tekan ( $\sigma_c$ ), kuat tarik ( $\tau$ ) dan lain sebagainya.

Model yang digunakan untuk analisis tersebut dilakukan dengan Software Phase 2 versi 8.0. Prinsip dasar modelnya adalah memilah dan membagi-bagi masalah yang kompleks menjadi sejumlah aspek yang lebih kecil dan sederhana yang disebut dengan elemen. Permasalahan kemudian dirangkai kembali menjadi kompleks seperti awalnya. Metode elemen hingga (*finite elements method*) merupakan salah satu metode analisis numerik yang menggunakan pendekatan diferensial. Metode ini dapat dipakai untuk menganalisis kondisi tegangan dan regangan pada suatu struktur batuan.

### **3.7 Sistem Penguatan Terowongan**

Setiap jenis penyanggan massa batuan hanya akan berfungsi dengan baik apabila disesuaikan dengan kondisi lokal massa batuan di dalam terowongan. Dalam menentukannya harus memperhatikan faktor-faktor yaitu kondisi geologi, kelas dan tipe massa batuan, kondisi beban runtuh yang akan diterima penyangga, metode dan sifat penggalian, sifat dan kekuatan penyangga, bentuk dan dimensi terowongan serta efisiensi pemasangan penyanggaan atau penguatan (Hoek et.al., 1995).

Akibat dari suatu penggalian, umumnya terjadi degradasi tegangan pada batuan/tanah di sekitarnya. Penurunan tegangan yang berkelanjutan membawa efek merugikan bagi kestabilan terowongan. Untuk mencegah hal ini, dibutuhkan sistem penguatan untuk permukaan terowongan.

Baut batuan merupakan batang baja yang ditanamkan di dalam batuan dan merupakan suatu sistem angkur untuk permukaan terowongan. Secara umum, penggunaan baut batuan menurut E. Hoek., dkk. (1980) adalah sebagai berikut :

- Pengaruh suspensi, yaitu sebagai stabilator pada batuan yang retak atau yang mengalami penggalan dengan ledakan.
- Merekatkan lapisan, fungsi ini terjadi bila baut batuan ditempatkan dengan menembus lapisan berbeda yang relatif tipis.
- Menaikan kemampuan dukung, dimana terganggan pada baut batuan akan menekan batuan sehingga menghasilkan kekakuan yang baik dan meningkatkan kekuatan geser.

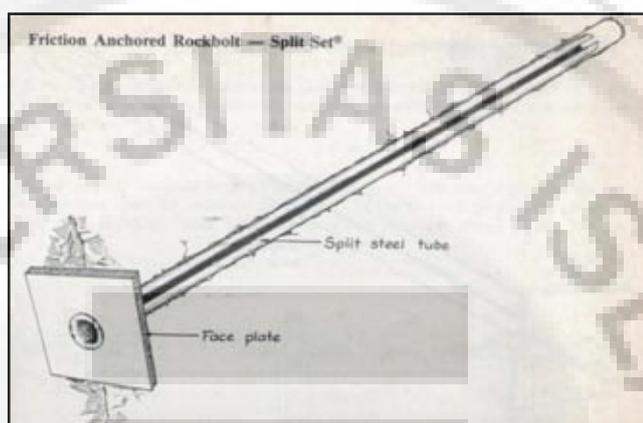
#### **3.7.1 Baut Batuan dengan Pengikatan Geser**

Bermacam-macam baut batuan yang telah digunakan saat ini di seluruh dunia. Banyak diantaranya hanya memperlihatkan perbedaan kecil dalam rancangannya, namun konsep dasarnya sama. Jenis baut batuan dapat dibedakan berdasarkan cara pengikatannya, yaitu :

- Baut batuan dengan pengikatan mekanis (*mechanically anchored rockbolts*)
- Baut batuan dengan pengikatan menggunakan zat kimia (*grouted rockbolts*)
- Baut batuan dengan pengikatan menggunakan kabel (*grouted cable bolts*)
- Baut batuan dengan pengikatan geser (*friction anchored rockbolt*).

Baut batuan yang digunakan pada penambangan emas di PT Cibaliung Sumberdaya adalah tipe split set. Tipe ini merupakan salah satu dari dua tipe baut batuan yang masuk kedalam jenis baut batuan dengan pengikatan geser. Tipe lainnya untuk jenis batuan ini adalah *swellex*. Baut batuan dengan pengikatan geser mirip dengan baut batuan dengan pengikatan mekanik, yaitu pemasangan operasinya tidak diganggu oleh kondisi batuan yang basah.

Mekanisme pengikatan *split set* timbul dari kekuatan geser dari adanya pembebanan yang mendekati batas beban maksimum dari baut batuan saat baut batuan akan bergelincir, sedangkan pengikatan dari *swellex* ditimbulkan dari kekuatan geser pembebanan (B. Stillborg, 1986). Gambar baut batuan jenis *split set* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Sumber : B. Stillborg, 1986

**Gambar 3.6**  
**Split Set**

Keuntungan dari jenis ini adalah pemasangannya sederhana, memberikan kerja penyanggaan dengan cepat setelah pemasangannya, tidak ada perangkat keras lain yang dibutuhkan dalam pemasangannya selain *jet leg* atau *jumbo drill*, serta mudah dikombinasikan dengan mesh kawat (*wire mesh*). Kerugiannya adalah relatif lebih mahal jika dibandingkan dengan jenis baut batuan yang lain, dibutuhkan keakuratan mengenai ukuran diameter lubang bor sehingga didapatkan pemasangan yang benar dan tepat untuk memperoleh keakuratan lubang yang didapatkan. Selain itu pemasangan baut batuan yang panjang dapat menjadi sulit, dan tidak dapat digunakan dalam pemasangan jangka panjang kecuali jika dilindungi oleh anti korosi. (Irwandy Arif, 2002).

Barton (1974) memberikan informasi mengenai perhitungan panjang baut batuan, kebutuhan pemasangan baut batuan dalam satu baris serta kerapatannya. Berikut adalah persamaan rumus-rumusnya.

- Panjang baut batuan (L)

$$L = \frac{2+0,15 B}{ESR} \dots\dots\dots (9)$$

- Kebutuhan baut batuan (n)

$$n = \frac{W \times FK}{C} \dots\dots\dots (10)$$

- Kerapatan pemasangan baut batuan (s)

$$s = \frac{L}{n} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan :

B = Lebar pada terowongan (m)

ESR = Faktor penguatan pada terowongan (m)

W = Beban luas atap pada setiap kemajuan bukaan (ton)

FK = Faktor keamanan yang direncanakan

C = Kapasitas baut batuan (MPa)

L = Lebar pemasangan baut batuan (m)

### 3.7.2 Perlengkapan Penunjang Baut Batuan

Komponen penunjang yang digunakan bersama baut batuan adalah mesh kawat (*wire mesh*), pelat baja (*face plate*), beton tembak (*shotcrete*), dan tali pengikat batuan (*rock straps*). Berikut adalah penjelasannya :

#### 1. Beton Tembak (*Shotcrete*)

Beton tembak merupakan salah satu jenis penyangga yang bersifat pasif. Beton tembak dapat dihasilkan melalui campuran kering dimana campuran semennya kering dan air ditambahkan pada penyemprot (*nozzle*). Selain itu beton tembakan juga dapat dihasilkan dari campuran basah yang pada dasarnya memiliki komponen yang sama dengan campuran kering hanya airnya telah dicampurkan dalam tempat pengaduk.

Parameter yang dapat dihitung untuk sistem penguatan *shotcrete* adalah tebal penyemprotannya. Berikut adalah perhitungan kebutuhan sistem penguatan *shotcrete* pada terowongan dengan geometri teoritis.

- Ijin kuat tarik *shotcrete* ( $i$ )

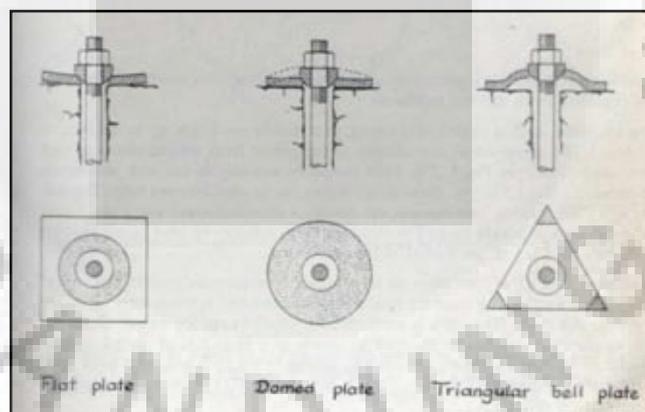
$$i = 0,2 \times \frac{t_b}{FK} \dots\dots\dots (12)$$

- Ketebalan *shotcrete* ( $t$ )

$$t = 0,343 \times \frac{P_{rnr} \times l}{i} \dots\dots\dots (13)$$

## 2. Pelat Besi (*Face Plate*)

Sebuah pelat besi dirancang untuk mendistribusikan beban pada kepala baut secara merata di sekitar batuan sekelilingnya. Pada gambar di bawah ini dapat dilihat jenis-jenis pelat besi.



Sumber : B. Stillborg, 1986

**Gambar 3.7**  
**Tipe Face Plate**

## 3. Mes Kawat (*Wire Mesh*)

Mesh kawat yang sering digunakan adalah *chailink mesh* dan *weld mesh*. *Chailink mesh* digunakan pada permukaan karena kuat dan fleksibel, sedangkan *weld mesh* terdiri atas kabel baja yang diatur dengan pola segiempat atau bujur sangkar dan disambung dengan cara dipatri pada titik-titik perpotongnya, serta memperkuat beton tembak dan lebih kaku.

Dalam hal ini, mes kawat yang digunakan di terowongan produksi dan terowongan pengambangan tambang PT Cibaliung Sumberdaya adalah jenis weld mesh. Hal itu disebabkan untuk memenuhi fungsinya untuk memperkuat beton tembak agar lebih kaku, selain itu megikat material batuan yang kecil dan menahanya agar tidak jatuh.

