

## DISAIN TEROWONGAN DI BATUAN: PERBANDINGAN METODE KLASIFIKASI BATUAN DAN METODE ELEMEN HINGGA KRITERIA RUNTUH GETAS-DAKTAIL BATUAN BERKEKAR

Wilham George Louhenapessy<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Calvin Institute of Technology

Email: wilham.louhenapessy@calvin.ac.id

Masuk: 9-03-2020, revisi: 25-03-2020, diterima untuk diterbitkan: 22-04-2020

---

### ABSTRACT

Dalam infrastruktur akhir-akhir ini di Indonesia, telah dibangun banyak terowongan di batuan. Dalam mendisain penyangga terowongan, umumnya yang dipakai adalah: metode disain dengan Sistem Klasifikasi Batuan (NATM, Q-System, RMR, R<sub>Mi</sub>, dll). Kelemahan Klasifikasi Sistem Penyangga batuan dari Institut Geoteknik Norwegia (NGI, atau disebut sebagai Q-System) adalah sbb: a. kurang diperhitungkannya arah kekar terhadap permukaan galian terowongan; b. tidak diperhatikan pengaruh waktu; dan c. kurang analisa pengaruh air didalam kekar dari masa batuan. Keruntuhan batuan, dipostulasikan disebabkan oleh dua pilihan runtuh: 1). runtuhnya batuan utuh / intact (intact rock) atau, 2). runtuhnya batuan berkekar (joint rock). Tahun 1977 Barton-Bandis mengusulkan kriteria runtuh berdasarkan variabel kekasaran kekar yang diambil dari Q-system, namun diperbaharui ditahun 1996 oleh Papaliangas dkk., yang mengusulkan terobosan baru kedalam rumus dasar keruntuhan kekar dengan mengimplementasikan pengaruh Transisi Getas-Duktail (Brittle-Ductile Transition / BDT) pada kekar. Kriteria runtuh lama - Mohr-Coulomb- dan Barton-Bandis tidak mengakomodasikan BDT. Dalam paper ini,

- i) penulis mencoba mengimplementasikan algoritma Papaliangas (BDT) kedalam algoritma Multilaminat Model FEM dari Zienkiewicz-Pande (1977).
- ii) Diusulkan suatu metode penyangga terowongan yang lebih rasional dengan mempertimbangkan pengaruh-pengaruh tersebut diatas (a. s/d c) berdasarkan rekayasa numerik: Metode Elemen Hingga Multilaminat untuk masa kekar batuan / joint rock mass (Louhenapessy 2000, 2003 dan Zienkiewicz-Pande 1977).

Akan ditampilkan diagram-diagram bunga (Rose Diagrams), tabel-tabel disain, Indeks Keruntuhan dan kurva-kurva yang berguna untuk praktek rekayasa pembuatan terowongan, tanpa 'shotcrete lining'. Studi/contoh numerik terfokus pada terowongan lingkaran, dengan sebuah kedalaman, berbagai tekanan lateral, berbagai arah kekar dan dua kriteria runtuh (Mohr-Coulomb dan Papaliangas /Brittle-Ductile).

**Kata kunci:** Kekar (joint rock); Model Multilaminasi (Multilaminat Model); Penyangga terowongan (tunnel support); Diagram Bunga (Rose Diagrams) ; Indeks Keruntuhan (Failure Indices); Nilai Q; kriteria runtuh Papaliangas dan Mohr-Coulomb.

### 1. PENDAHULUAN

Banyak pekerjaan infrastruktur (jalan & bendungan), teknik pertambangan dan teknik sipil lainnya yang melibatkan pembuatan perkuatan lereng, penyangga terowongan di batuan (Koesnaryo & Rai 1998), seperti terowongan jalan raya dan terowongan dibawah bendungan. Secara umum batuan yang ditemukan adalah batuan utuh (*intact rock*) dan batuan berkekar (*joint rock*). Perencanaan pembangunan proyek terowongan batuan melibatkan berbagai bidang ilmu, dan satu diantaranya adalah mekanika batuan dan pemodelan konstitutip (*constitutive model & failure criterion*) dari material batuan utuh / berkekar tsb. Prof. O.C. Zienkiewicz dkk. (1968) mengusulkan kriteria batuan sebagai material yang tidak dapat menahan tarik (no-tension material) dengan memakai kriteria runtuh Mohr-Coulomb untuk kontrol tegangan gesernya. Papaliangas (1996) melakukan riset-percobaan kekar batuan dan mengusulkan suatu terobosan baru dalam rumus dasar keruntuhan batuan, yang didukung oleh riset-riset para pakar Geologi dan Geofisik sebelumnya (Greenwood & Williamson 1966, Scholz 1990). Model konstitutip baru Papaliangas segera disambut dengan algoritma pemodelan numerik konstitutip dari batuan utuh (*intact rock*) dan batuan berkekar (*joint rock*) oleh penulis (Louhenapessy 2000, Papaliangas 1996). Dari studi literatur, kriteria runtuh Mohr-Coulomb yang dipergunakan para pakar mekanika batuan sebelumnya (Zienkiewicz dkk. 1968, Locat dkk.

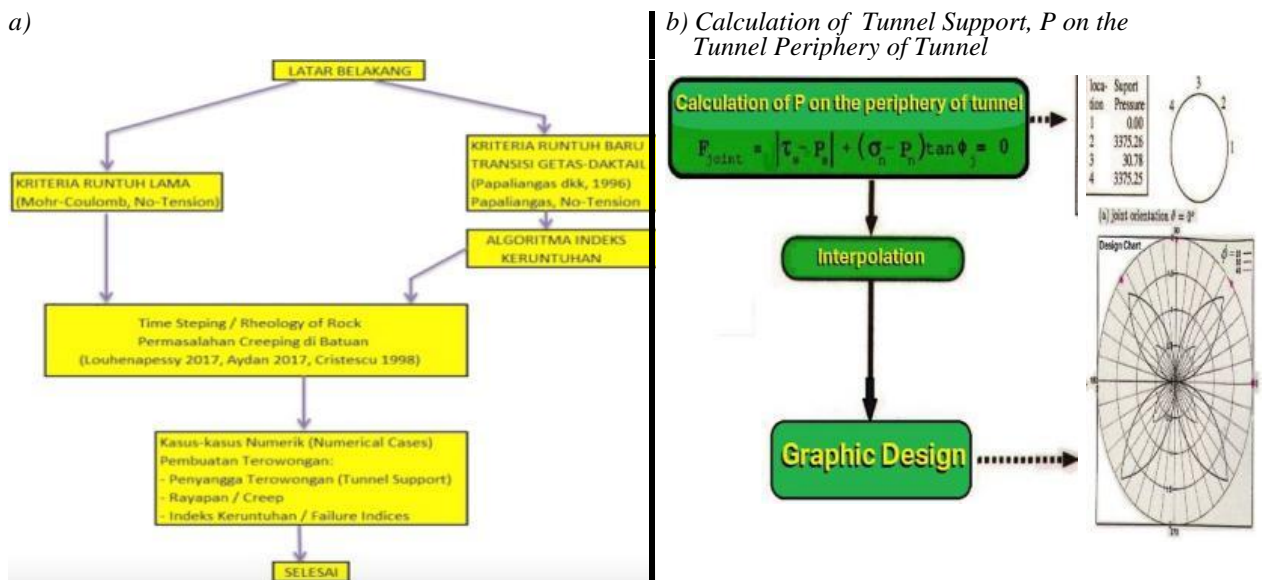
2000, Hetcher 1995, McLean 1987, Nganga 2018) belum bisa menerapkan fenomena Transisi Getas-Daktail (BDT).

Umumnya tinjauan dipisahkan dalam masing-masing masalah. Seperti McLean (1987), hanya meninjau keruntuhan batuan utuh (intact rock) karena umumnya hal itu terjadi dalam problem rekayasa perminyakan (simulasi lubang bor / “wellbore”). Problem “wellbore” menyangkut kedalaman yang besar, maka umumnya dijumpai keruntuhan pada batuan utuh (intact rock); walaupun keruntuhan kekar (joint rock) juga terjadi. Demikian pula untuk Nganga (2018). Sedangkan Locat dkk. (2000) sudah menyuguhkan grafik keruntuhan batuan utuh dan kekar batuan dalam satu gambar, namun karena masalah yang dihadapi adalah kestabilan lereng dengan kedalaman rendah maka yang dijumpai umumnya keruntuhan pada kekar batuan. Penulis, dalam software *Newmo3962* (Louhenapessy 2000, Louhenapessy-Pande 2000), mencoba mengimplementasikan algoritma baru yang diharapkan dapat bermanfaat dalam memecahan problem-problem mekanika batuan.

## 2. METODOLOGI

### 2.1 Klasifikasi Batuan

Terzaghi (1946), dengan berdasarkan metode observasi kestabilan penggalian terowongan kereta api tua di Pegunungan Alpen, belmengusulkan untuk mengkorelasikan kualitas massa batuan dengan beban batuan pada busur-baja (*Steel arch*) penyangga terowongan. Beberapa metodologi empiris<sup>1</sup>, tsb. a/l.: RQD (Deere 1967), Q-system (Barton et.al. 1974), sistem RMR (Bieniawski 1990) dan RMi (Palmstrom 1995) adalah upaya untuk mengklasifikasikan sifat dan kondisi massa batuan sebagai suatu “value”/nilai (kuantifikasi).



Gambar 1 a) Sistematika Pembahasan, b) Flow Chart Perhitungan Penyangga Terowongan (Section 7)

Meskipun para insinyur / para ahli geologi telah memakai metode empiris kedalam analisa/disain penyangga terowongan, prosedur ini tidak cocok dari satu lokasi ke lokasi lain karena variabilitas yang melekat pada kondisi batuan di-*site* (Pande 1995). Jadi, meskipun riset mereka mencakup berbagai kondisi yang dihadapi di lapangan (Seraphim & Pereira 1983, Hoek dkk. 1995), banyak parameter input sangat sulit untuk diukur (Milne 1991). Pande

<sup>1</sup> akumulasi referensi disain/konstruksi pengalaman masa lalu, atau Sistem Klasifikasi Massa Batuan

(1995), Riedmuller (1997) dan Pells & Bertuzzi (2008) menyatakan bahwa dalam prakteknya, sistem klasifikasi tidak memadai untuk mendukung penentuan dan evaluasi stabilitas dalam kondisi geologis yang kompleks. Di Indonesia, industri pertambangan, infrastruktur / terowongan jalan Toll dan hidroelektrik / terowongan bendungan, sedang tren menggunakan metode empiris: NATM, Q-system, RMR dan RMI (Muldianto 2018, Nurfaida 2018 Koesnaryo & Rai 1998). Penerapan lain disain terowongan, ialah dengan metode numerik dengan menggunakan pendekatan sbb.: a. FEM (Honisch 1988, Hoek et.al.1995); b. UDEC (Cundall 1980) dan c. FLAC (Brady 1992); namun, kurangnya pemodelan rasional massa batuan berkekar; kesulitan dalam upaya untuk mensimulasikan detail sifat massa batuan dan faktor-faktor lain telah menghambat perkembangan lebih lanjut (Gambar 3). Adapun sistematika pembahasan makalah ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 1a. dan pembahasan penyangga terowongan (Gambar 1b).

## 2.2 Kriteria runtuh Mohr-Coulomb, Patton dan Barton-Choubey

Pemodelan kriteria runtuh Mohr-Coulomb untuk kekar batuan adalah:

$$F = |\tau_j| + \sigma_n \tan \phi_j = 0 \quad (1)$$

Dimana,  $\phi_j$  = sudut geser kekar batuan (*joint rock friction angle*),  $\tau_j$  = tegangan geser pada bidang kekar, dan  $\sigma_n$  = tegangan normal pada permukaan kekar. Pada konperensi mekanika batuan pertama di Lisbon, tahun 1966, Patton mengusulkan tambahan sudut dilasional (*dilational angle*) kedalam sudut geser kekar. Hal ini didapatnya dari studi dan evaluasi yang terperinci dari problem-problem kemiringan lereng (Patton 1966), dan menunjukkan hubungan langsung antara tegangan geser,  $\tau$  dan sudut dilasional,  $i$  sbb.:

$$\tau_j = \sigma_n \tan (\phi_r + i) \quad (2a)$$

Dimana,  $\phi_r$  = sudut geser yang tersisa (*residual*) pada kekar batuan,  $\tau_j$  = tegangan geser pada bidang kekar, dan  $\sigma_n$  = tegangan normal pada permukaan kekar. Kriteria runtuhnya menjadi :

$$F = |\tau_j| + \sigma_n \tan (\phi_r + i) = 0 \quad (2b)$$

Pada tahun 1977, Barton dan Choubey memperbaiki criteria Patton diatas dengan memperkenalkan ketergantungan tegangan normal,  $\sigma_n$  pada sudut dilasional,  $i$  dalam bentuk persamaan empiris sbb. :

$$i = JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n) \quad (3)$$

Dengan JRC = Koefisien kekasaran permukaan kekar (*Joint Roughness Coefficient*), dan JCS = Koefisien kekuatan tekan permukaan kekar (*Joint Wall Compressive strength*).

## 2.3 Kriteria runtuh Britle-Ductile (BDT) dari Papaliangas (1996)

Model kriteria runtuh Getas-Daktail untuk kekar batuan yang diusulkan oleh Papaliangas adalah (Lihat Gambar 2):

$$F = |\tau_j| + \sigma_n \tan (\phi_m + \psi) = 0 \quad (4)$$

$$\text{dimana,} \quad \tan \psi = \tan \psi_o \frac{\log_{10} (\sigma_{nT} / \sigma_n)}{\log_{10} (\sigma_{nT} / \sigma_{no})} \quad (5)$$

dan,  $\sigma_{no}$  = tegangan normal (*normal stress*) pada permukaan kekar;  $\phi_m$  = sudut geser dalam kekar yang bukan merupakan sudut dilasional;  $\psi$  = simbol sudut dilasional pada saat puncak dari tegangan geser;  $\psi_o$  = sudut dilasional maksimum pada suatu tegangan normal ( $\sigma_{no}$ ) yang tidak menyebabkan terjadinya deformasi (*asperity*);  $\sigma_{nT}$  = tegangan normal efektif yang mengakhiri semua sudut dilasional.

## 2.4. Kriteria Batuan Utuh

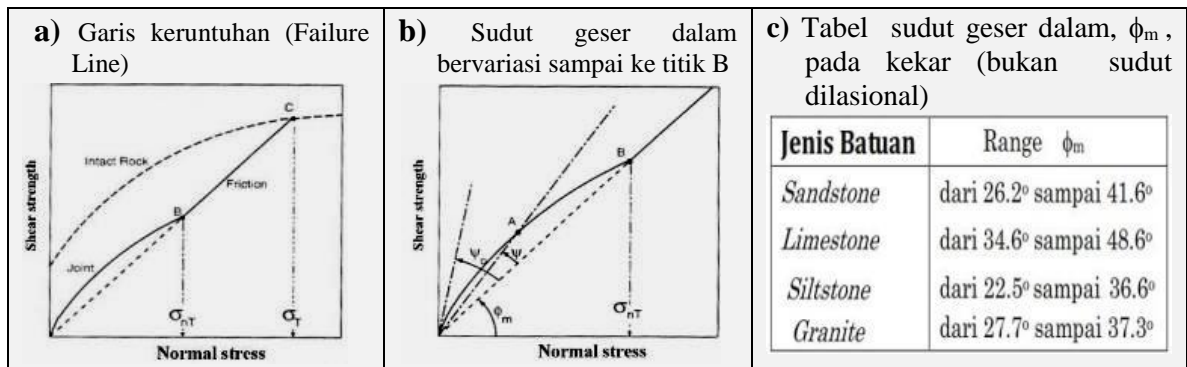
Kriteria runtuh untuk batuan utuh adalah memakai Kriteria runtuh Mohr-Coulomb dengan format sbb.,

$$F = |\tau_i| - C_o + \sigma_n \tan \phi_o = 0 \quad (6)$$

dimana  $\sigma_{ni}$  = tegangan normal pada bidang keruntuhan didalam batuan utuh,  $\phi_o$  = sudut geser dalam dari batuan utuh,  $C_o$  = kohesi batuan utuh tsb. Agar dapat dicari besarnya dalam gaya-gaya dengan berorientasi pada sumbu lokal, maka diperlukan bentuk persamaan dalam bentuk *tegangan-tegangan invariant*, maka persamaan (6) menjadi:

$$F = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} (\cos\theta + (\sin\theta \sin\phi_o) / \sqrt{3}) - \sigma_m \sin \phi_o - C_o \cos \phi_o = 0 \quad (7)$$

dimana  $\bar{\sigma}$ ,  $\theta$  dan  $\sigma_m$  adalah komponen-komponen invariant (Pande dkk. 1990).



Gambar 2. Grafik garis runtuh dan Tabel sudut geser dalam,  $\phi_m$  (Papaliangas dkk. 1996)



Gambar 3. Tantangan-tantangan dalam pemodelan “properties of rock” (Louhenapessy 2000, 2017).

## 2.5. Tantangan Dalam Pemodelan Elemen Hingga

Tantangan dalam pemodelan Metode Elemen Hingga, khususnya dalam memodelkan struktur batuan berkekar antara lain (Gambar 3):

1. Tantangan dalam mengimplementasi kekasaran kekar (dan sesar) didalam pemodelan,
2. Bagaimana memodelkan RQD
3. Bagaimana memodelkan jarak-antar kekar dan jumlah set kekar (*joint set*)
4. Arah kekar (*Dip Angle / joint rock orientation*)
5. Tegangan-tegangan/regangan-regangan awal (*in-situ stress/strain*) disekitar terowongan
6. Pengaruh air (*pore pressure*) dan

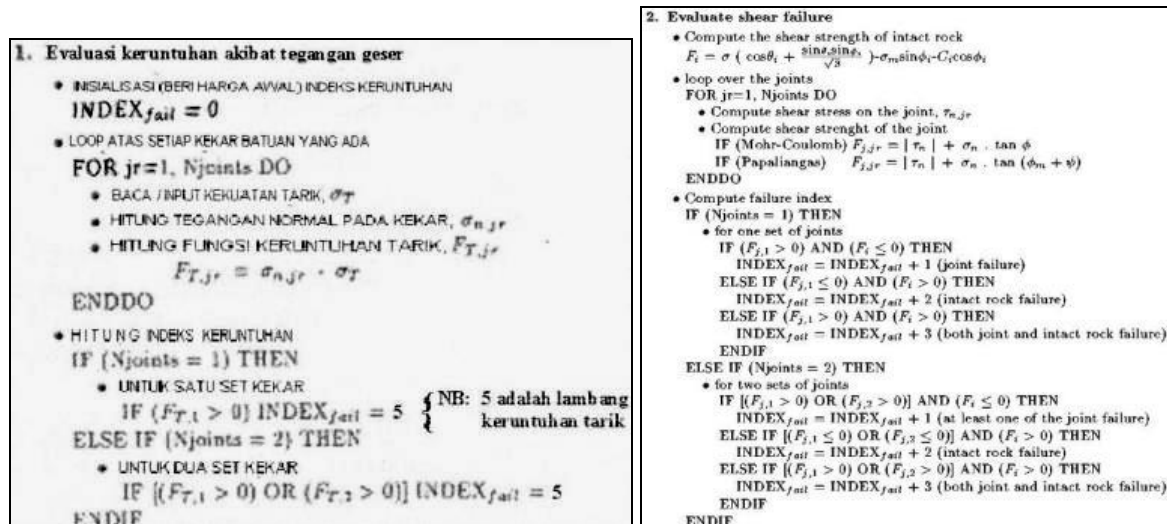
7. Pengaruh waktu / *Rheology of rock* (Lihat Louhenapessy 2003 dan 2017).

Pendekatan Elemen Hingga yang berbasiskan Multilaminat-Model (Zienkiewicz-Pande 1977) akan menjawab tantangan-tantangan ini.

### 3. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Algoritma Indeks Keruntuhan

Tegangan-tegangan yang terjadi pada sebuah titik disebuah kedalaman suatu struktur di massa batuan (jointed rock mass) yang diakibatkan galian pembuatan terowongan (tunneling), gaya-gaya dari dalam bumi: tegangan lateral in-situ (in-situ stress), kehadiran air, dsb. akan dianalisa oleh perhitungan numerik (Metode Elemen Hingga). Proses selanjutnya masuk kedalam algoritma pemilihan keruntuhan, yang dibuat untuk memutuskan apakah kemungkinan-kemungkinan keruntuhan berikut ini dapat terjadi: (a) keruntuhan batuan utuh. Parameter-parameter kuat geser batuan utuh diuji dan diuji pula fungsi runtuhnya (*Persamaan 7*), dan (b) keruntuhan kekar-kekar batuan: Parameter-parameter kuat geser kekar batuan diuji dan diuji pula fungsi-fungsi runtuhnya (*Persamaan 1, 4 dan 5*). Demikian pula, (c) kehadiran tegangan tarik ditek (Zienkiewicz 1968). Suatu algoritma yang menentukan tempat-tempat dimana keruntuhan terjadi, misalnya “apakah pada batuan utuh atau kekar batuan atau tarik?”. Hal ini diusulkan dalam paper ini dan secara ringkas ditampilkan dalam Gambar 4. Secara detail dapat dilihat pada publikasi lainnya (Louhenapessy 1998, 2000, 2017). Prosedur ini diulang lagi sampai semua titik buhul/nodal (dari FEM) selesai dianalisa.



Gambar 4 a) KIRI: Algoritma tahap-tahap pengambilan keputusan untuk menghasilkan Indeks Keruntuhan Tarik dan b) KANAN: Algoritma tahapan pengambilan keputusan untuk menghasilkan Indeks Keruntuhan Kekar Batuan (Louhenapessy 2000).

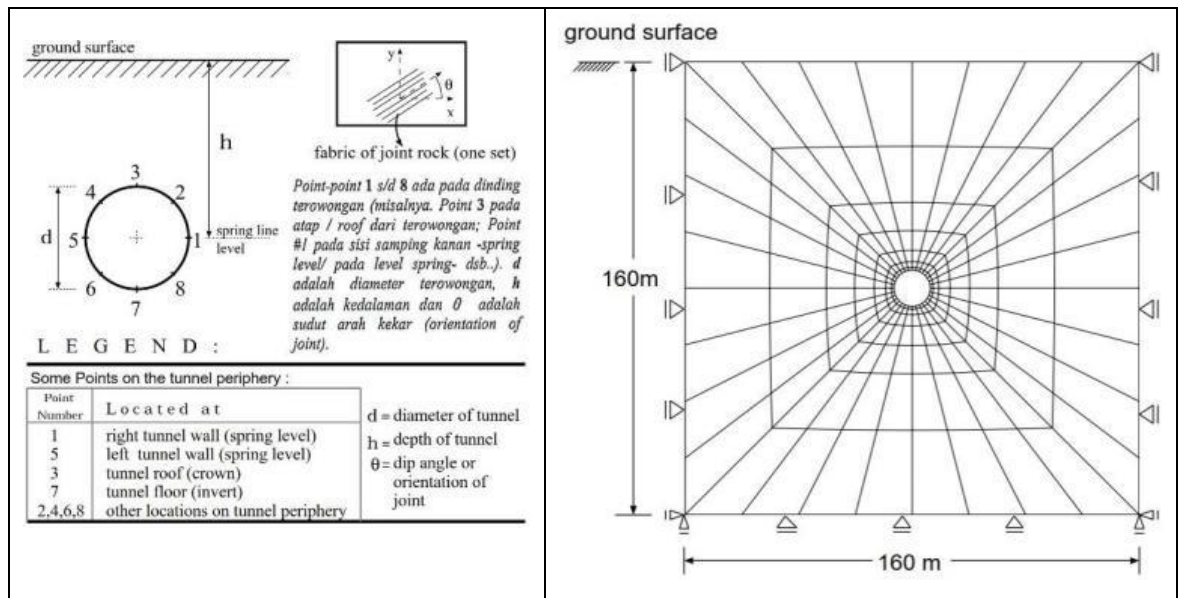
#### 3.2 Contoh Numerik Terowongan Lingkaran

Sebuah terowongan lingkaran digali pada sebuah kedalaman didalam massa batuan berkekar yang memiliki satu set kekar (Gambar 5 dan Tabel 1). Hal ini ditampilkan untuk contoh perhitungan Indeks Keruntuhan. Gambar 5.b. menunjukkan Jaring Elemen Hingga yang digunakan dalam analisis ini, yang terdiri dari 736 titik buhul (*nodes*) dan 224 Elemen Isoparametrik ber-buhul-delapan (*eight noded isoparametric elements*).

##### a. Hasil-Hasil Run Multilaminat Model: Indeks Keruntuhan

Indeks keruntuhan (Failure Indices<sup>2</sup>) seperti ditunjukkan dalam Gambar 6, dapat dipergunakan dalam perencanaan disain penyangga terowongan. Gambar 6.a s/d Gambar 6.c. menunjukkan daerah Indeks keruntuhan disekitar terowongan untuk bermacam arah kekar,  $\theta = 0^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $90^\circ$  dengan memakai kriteria runtuh Papaliangas dengan  $\phi_m = 30^\circ$ . Arti simbol-simbol indeks keruntuhan ini adalah:

- “0” untuk daerah yang tidak runtuh
- “1” untuk daerah runtuh akibat kekuatan batuan utuh terlewati,
- “2” untuk daerah runtuh akibat kekuatan geser kekar batuan dilewati, dan
- “5” adalah daerah runtuh akibat kekuatan tarik kekar batuan dilewati.



Gambar 5. a) Geometri Terowongan & Set Kekar (joint rock), b) Jaring Elemen Hingga (FE Mesh)

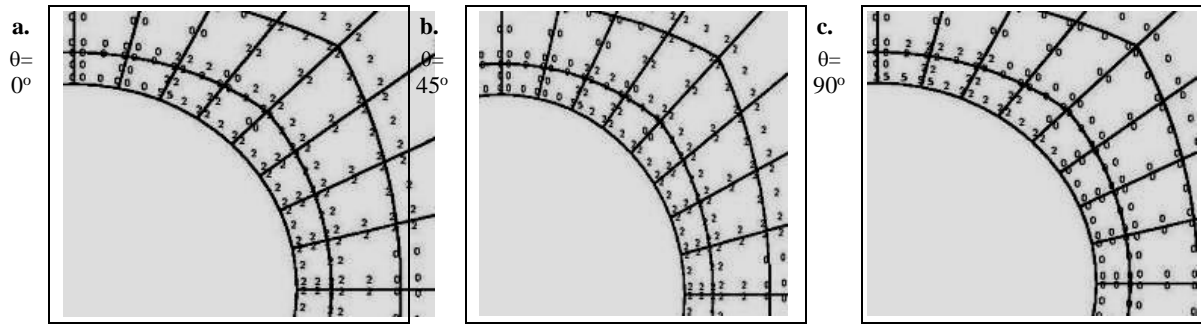
**Table 1** Parameter Material Batuan (Rockmass)

Batuan utuh (Intact Rock)	Batuan berkekar (Joint Rock)
$E = 3 \times 10^7$ kPa	$C_n = 1 \times 10^{-7}$ m/kPa
$\nu = 0.3$	$C_s = 2 \times 10^{-7}$ m/kPa
$c_i = 28870$ kPa	rock joint spacing = 1 m
$\phi_i = 30^\circ$	Cohesion = 0
$\rho = 24.5$ kN/m <sup>3</sup>	Mohr-Coulomb : $\phi = 20^\circ, 30^\circ, \text{ and } 40^\circ$
	Papaliangas : $\phi_m = 30^\circ \text{ and } 40^\circ$
	$\psi_o = 27^\circ$

Sumber: Louhenapessy (2000)

Gambar 6.a menunjukkan Indeks Keruntuhan disekitar dinding terowongan dan terlihat bahwa pada atap (untuk arah kekar batuan,  $\theta = 0^\circ$  dan tegangan insitu  $K_o = 0.333$ ) tidak terjadi keruntuhan Pada hal yang lain, dalam Gambar 6.c, keruntuhan tarik terlihat pada atap dari dinding terowongan (untuk arah kekar batuan,  $\theta = 90^\circ$  dan tegangan insitu  $K_o = 0.333$ ).

<sup>2</sup> Disertasi Wilham G. Louhenapessy (2000)



Gambar 6. a), b) dan c) Identifikasi jenis keruntuhan dengan 1 set kekar dan berbagai arah kekar.

Perlu dicatat pula, bahwa umumnya -pada dinding permukaan terowongan-, keruntuhan terjadi akibat geser pada kekar, tetapi ada juga beberapa kondisi dimana kekar runtuh akibat tarik atau keruntuhan batuan utuh, khususnya diterowongan yang berada pada kedalaman yang besar (Louhenapessy 2000 dan 2003).

### b. Hasil-Hasil Run Multilaminat Model: Diagram Bunga / Rose Diagrams

Diagram Bunga (*Rose Diagrams*) adalah alat presentasi yang berguna untuk menyajikan hasil studi parametrik analisis tekanan penyangga terowongan. Di sini tekanan penyangga yang diperlukan pada suatu titik di sisi terowongan diplot sebagai garis radial, yang panjangnya mewakili tekanan penyangga. Diagram seperti ini ditunjukkan pada Gambar 7a dan 7b. Tekanan penyangga telah dinormalisasi dengan mengacu pada tekanan geostatik di pusat terowongan sebelum penggalan  $\gamma h$ , dan dihitung dari persamaan berikut,

$$N = P / (\gamma h) \tag{8}$$

dimana  $N$  = tegangan penyangga terowongan ternormalisasi,  $P$  = tegangan penyangga terowongan yang dihitung dari analisa elemen hingga (FEM),  $\gamma$  adalah berat jenis batuan dan  $h$  = kedalaman terowongan. Dari diagram-diagram tsb., tegangan penyangga didapat berdasarkan kedalaman terowongan (*depth of tunnel*), sudut geser dalam kekar (*joint friction angle*)  $\phi$ , perbandingan tegangan in-situ,  $K_o$ , dan arah kekar (orientation of joints),  $\theta$ . Persyaratan tegangan penyangga bervariasi dari titik ke titik dipermukaan terowongan (*periphery of the tunnel*).

### c. Perbandingan dengan NGI atau Sistem Klasifikasi Q

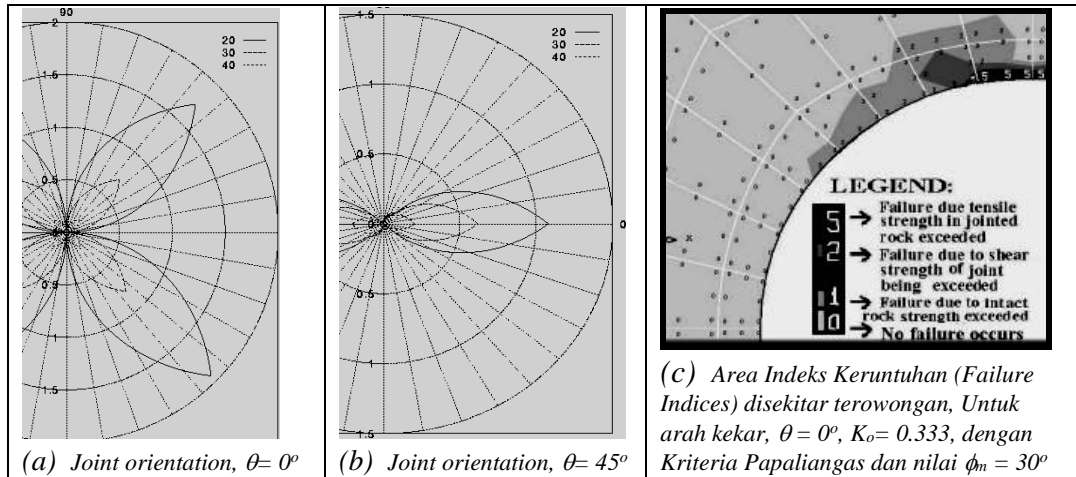
Di sini kita memeriksa kasus penyangga terowongan dan membandingkannya dengan yang diperoleh dari metode empiris (*Q System*). Sebuah terowongan dangkal (Gambar 7.c. dan Tabel 2), dengan  $K_o = 0,333, 1,0$  dan  $2,0$ ; dan berada di dalam batu pasir dengan satu *set* kekar; dan batuan utuh ber-kekuatan tekan,  $\sigma_c = 100$  MPa. Kualitas massa batuan,  $Q$  akan dihitung berdasarkan 6 parameter (Barton et.al. 1974, Hoek dkk. 1995) yang didefinisikan sbb.,

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_s} \frac{J_w}{SRF} \quad \text{and} \quad P_{roof} = 0.667 J_n^{0.5} J_r^{-1} Q^{-1/3} \tag{9a} \text{ dan } (9b)$$

di mana RQD = Rock Quality Designation,  $J_n$  = nilai *set* kekar;  $J_r$  = nilai kekasaran kekar;  $J_a$  = nilai perubahan/alterasi kekar;  $J_w$  = faktor reduksi air kekar, SRF adalah faktor reduksi tegangan dan  $P_{roof}$  adalah tekanan penyangga permanen di atap-terowongan. Data berikut ini dipakai untuk perbandingan (Palmstrom 1995, Louhenapessy 1998):

- RQD = 72%,  $J_n = 2$  (satu set bersama),  $J_r = 1,5$ ,  $J_a = 1,0$  dan  $J_w = 1,0$  (kering),

- $\sigma_1$  adalah tegangan utama maksimum (dari analisis elemen hingga), untuk terowongan CASE-I:  $\sigma_1 = 1.09$  MPa.  $\sigma_c / \sigma_1 = 91.5$  (tekanan sedang, SRF = 1.0);
- Berdasarkan parameter di atas, didapat:  $Q = 54.00$  dan  $P_{roof} = 16.6$  kPa.



Gambar 7. a) & b) Tegangan Penyangga Terowongan (Normalisasi), c) Tabel Indeks Keruntuhan

Tabel 2 menunjukkan desain penyangga terowongan sistem Q dan metode yang diusulkan. Desain jarak dekat baut menggunakan sistem Q hanya menyediakan satu nilai untuk beberapa parameter dan kriteria yang berbeda dalam massa batuan. Untuk CASE I, desain jarak pagar minimum dan maksimum dengan metode yang diusulkan adalah 262 mm dan 7555 mm, yang hampir 9% dan 250% dari sistem klasifikasi Q. Secara umum metode yang diusulkan memberikan informasi yang lebih luas yaitu zona dan luas area yang akan dibaut batuan diindikasikan. Selain itu, didapat solusi yang lebih rasional dan praktis dibandingkan dengan hasil dari *Q-system* (desain *Q-system* terlalu konservatif dalam beberapa kasus dan juga mengarah ke desain yang tidak aman di kasus yang lain).

Tabel 2. KASUS -I: Spasi Baut di Atap Terowongan (Diameter 25 mm)<sup>++</sup>

CIRCULAR TUNNEL CASE-I; Depth = 80 m; $J_r = 1.5$ (JRC = 6 or $\psi_o = 27^\circ$ )						
Orientation, $\theta$	In-situ Stress Ratio, $K_o$	Q system (mm)	$W_{M-C}$ (mm)		$W_{PAP}$ (mm)	
			Basic friction angle, $\phi_b$		Non dilational friction angle, $\phi_m$	
			30°	40°	30°	40°
0°	0.333	2970	2150	2150	2185	2185
	1.00	2970	No*	No*	No*	No*
	2.00	2970	No*	No*	No*	No*
45°	0.333	2970	2810	2840	7555	No*
	1.00	2970	400	694	526	No*
	2.00	2970	262	456	292	700

<sup>++</sup>  $W_{M-C}$  = dengan Kriteria Runtuh Kekar Mohr-Coulomb;  $W_{PAP}$  = dengan Kriteria Papaliangas No\* = Tanpa Penyangga Terowongan

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

### 4.1 KESIMPULAN

Dalam Section 1 s/d 4: Penjelasan teori-teori kriteria runtuh Papalaiangas (BDT), algoritma indeks keruntuhan, indeks keruntuhan pada batuan dengan berbagai arah orientasi kekar, jenis-aplikasi keruntuhan pada terowongan dibatuan telah disajikan.

Dalam Section 6: Analisis dan desain sistem penyangga terowongan adalah masalah kompleks analisis struktur batuan. Dalam makalah ini, sebuah metode yang rasional tetapi praktis dari tekanan pendukung komputasi telah disarankan. Teori multilaminat digunakan untuk menghitung tegangan penyangga yang akan mencegah runtuhnya massa batuan. Hasilnya



dijelaskan oleh seperangkat diagram-diagram bunga (*Rose Diagrams*) dan tabel indeks keruntuhan (*Failure Indices*).

Penyerdehanaan penampilan jenis dan daerah / zone keruntuhan dalam bentuk angka-angka indeks ("0", "1", "2" dan "5") memungkinkan analisis dan disain masalah-masalah geoteknik dengan lebih pasti. System ini telah Indeks Keruntuhan juga telah marak dipergunakan oleh Software-Software komersil lainnya (Louhenapessy 2017).

Pemodelan kriteria runtuh dengan transisi getas-dektail lebih presisi dibandingkan Mohr-Coulomb atau modifikasinya (Patton dan Barton). Penggunaan metode elemen hingga memungkinkan penyajian yang menarik bagi zone dan type runtuh material dan juga fleksibilitas dalam pemodelan kriteria runtuh.

#### **4.2 SARAN**

- Kedepan agar lebih sering dipakai Kriteria Runtuh Getas-Daktail (BDT/Papaliangas) dalam analisa tegangan mekanika batuan.
- Dari type keruntuhan (1, 2 atau 5), maka dapat ditentukan konstruksi perkuatannya (*Rock Bolt, Shotcrete* dsb.) untuk menyangga terowongan (*tunnel support*),
- Agar para insinyur dapat mengembangkan diagram mawar (*Rose Diagram*) untuk disain terowongan berdasarkan data laboratorium dan data lapangan yang sebenarnya. Diagram desain ini dapat dengan mudah dibaca untuk situasi apa pun selama konstruksi.
- Jika dipakai Metode Empiris / klasifikasi batuan *Q-system* (dan lain-lain), maka harus diingat bahwa hal ini kurang rasional, sehingga harus digunakan dengan bijaksana (*engineering judgement*), sehingga harus didukung analisa numerik metode elemen hingga multilaminat model dengan diagram/tabel *output* hasil-hasil analisa-nya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barton, N. dan Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, Vol. 10, pp. 1-54.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol 6, p. 189-236.
- Bentmark, J., 1998. *Rock support in weak rock – A study based on the URI project* – Doctoral Thesis #1026, Div. of Soil & Rock Mech., Royal Institute of Tech., Sweden.
- Bieniawski, Z.T., 1990. *Engineering rock mass classification*. Wiley, Chichester.
- Brady, B.H.G., 1992. Stress analysis for rock masses. In *Engineering in rock masses*. Edited by F.G. Bell, Butterworth & Heinemann, Oxford.
- Cundal, P.A., 1980. A generalized distinct element program for modelling joint rock. In *Rep. PCAR-180. Contract: DAJA37-79-C-0548 Euro. Research Office, US ARMY*.
- Greenwood, J. & Williamson, J., 1966. Contact of nom. flat surfaces. *Proc. Royal Soc.*, A.295.
- Hoek, E, Kaiser, P., & Bawden, W., 1995. *Support of Underground Excavation in Hard Rock*.
- Honisch, K., 1988. Rockmass modelling for large underground powerhouse. In *Numerical Methods in Geomechanics*, p. 1517-1522. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Koesnaryo, S. dan Rai, M. A., 1998. Peran kuantifikasi sifat-sifat massa batuan dan struktur geologis pada rancangan terowongan dalam batuan saat ini & masa mendatang. *Prosidi.: Geoteknik di Indonesia Menjelang Millenium ke-3*, Januari 1998, ITB, Bandung.
- Locat, Leroueil & Picarelli., 2000. Some Considerations on the Role of Geological History on Slope Stability and the Estimation of the Minimum Apparent Cohesion of a Rock Mass. In *Proc. of the 8th Int. Symp. on Landslides*. Held in Wales. Thomas Telford Ltd. UK.
- Louhenapessy, Wilham. G., 2017. On The New Startegy For Rock Slope Stability Analysis. In *Proc. of the PERHAPI's TPT XXVI*, Balikpapan, Indonesia, Tahun 2017.
- Louhenapessy, W.G., 1998. A Rational FE Analysis Based Procedure for the Analysis of Pressure on Tunnel Supports. *Proc. Canadian Soc.Mech.Eng. Ryerson Poly. Univ. Toronto*.
- Louhenapessy, Wilham G., 2000. *Analysis of Tunnel Supports using the Finite Element Method*. Ph.D. thesis. University of Wales Swansea, Swansea, UK.
- Louhenapessy, W.G., 2003. Finite Element Method in Rock Tunnel Engineering. In *Konperensi Geoteknik Indonesia – VI. HATTI*. Jakarta, 2003. ISBN 979-96668-2-1.
- Louhenapessy, W. & Pande, G.N., 1998. On a rational method of analysis and design of tunnel supports based on the FE technique. *J. of Rock Mech. & Tunnelling Tech.*, 4 (2), 97-124.
- Louhenapessy, W.G. and Pande, G. N., 1999. Finite element analysis for design of tunnel support. In *Proc. 7th Assoc. of Computational Mechanics in Engineering (ACME) Conf. 1999*. Durham Univ. 1999. England, UK.
- Louhenapessy, W. and Pande, G.N., 2000. *Newmo3962\_2000: User's Instruction Manual - Report No.CR/1022/00*. Civil Engineering Dept., Univ. of Wales Swansea, Swansea, UK.
- McLean., 1987. *Numerical Analysis of Well bore Instability*. PhD Thesis U.of London, 1987.
- Milne, D., Germain, P., Grant, D. and Noble, P., 1991. System. rock mass characteriz. for underground mine design. In *Proc.- 7th Int. Congr. on Rock Mech.*, Vol. 1 A.A. Balkema.
- Muldiyanto, H., 2018. Lesson Learned: Pembangunan Terowongan Pengelak JATIGEDE pada batuan yang dipengaruhi Struktur Geologi. In *Seminar Nasional Terowongan, September 2018*, Bandung. PUSJATAN, Kementrian PUPR.
- Nganga, S. Ikinya., 2018. Wellbore Stability Analysis in Geothermal Well Drilling. In *The 40th Anniversary Workshop*, Reykjavik, Iceland April 26 2018.
- Nurfaida, W., 2018. Lesson Learned: Pembangunan Terowongan di Jalan Tol Cisumdawu: Metode Konstruksi, Tantangan dan Solusi. In *Seminar Nasional Terowongan, September 2018*, Bandung. PUSJATAN, Kementrian PUPR.

- Palmstrom, A., 1995. RMI - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *Journal of Rock Mech. & Tunnelling Technology*, 1(2),p. 69-108.
- Pande, G.N., and Williams, J.R., 1990. *Numerical Methods in Rock Mechanics*. John Willey.
- Pande, G.N., 1995. Numerical Methods in Geotechnical Engineering: Stress Measurements in Rock – *Mission Report of Prof G.N. Pande Univ. Wales Swansea, Wales, UK* – under UNDP Project No. IND/90/009 (99) – Submitted to Central Soil & Materials Research Station, Hauz Khas, New Delhi, India.
- Papaliangas, T.T., Lumsden, A. and Hencher, S., 1996. Prediction of in situ shear strength of rock joints. *EUROC'96*. Barla (ed.), p.143-149, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Patton, F.D., 1966. Multiple modes of shear failure in rock. *In: Proc. 1st Congress ISRM, Vol. 1. Int. Society of Rock Mechanics, Lisbon*.
- Pells, P. J. and Bertuzzi, R., 2008. Discussion on article titled: *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-System* by Palmström and Broch. *Tunn. Undergr. Sp. Tech.* 23 (3), 2008.
- Riedmuller, G., 1997. Rock characterization for tunneling – Engineering geologist's point of view. *Felsbau (Rock Mechanics)*, Vol. 16 No. 1, p. 284-288.
- Seraphim, J.L. & Pereira, J.P., 1983. Consideration of the Geomech. Classif. of Bieniawski. *In: Proc. Int. Symp. On Eng. Geol. And Underground Construction, LNEC, Lisbon*.
- Scholz, C.H., 1990. *The Mechanics of Earthquake and Faulting*. Cambridge University Press.
- Terzaghi, K., 1946. Rock defects and loads on tunnel supports (Chapter 1). *In: Rock Tunneling With Steel Supports*. Proctor, R.V & White, T.L. (Editors), CSSC, Ohio.
- Zienkiewicz, O.C., Valliapan, S. and King, I.P., 1968. Stress Analysis of Rock as a 'no-tension Material. *Geotechnique*, Vol. 18, pp. 56-66.
- Zienkiewicz, O.C., & Pande, G.N., 1977. Time dependent multi-laminate model of rocks - a numerical study of deformation and failure of rock masses. *International Journal Numerical and Analytical Meth. in Geomech*, Vol 1, No. 1, p. 219-247.