

Aplikasi Metode Elemen Hingga dan Kriteria Runtuh Papaliangas Batuan Berkekar: Problem-Problem Analisa Terowongan, Kestabilan Lereng dan Wellbore Stability dalam Mekanika Batuan

G.L. Wilham¹

¹PT Signifikan Solusi Integrasi and Lecturer at Postgraduate Program of Civil Engineering Dept., National Institute of Science and Technology (ISTN), Jakarta, Indonesia.

¹E-mail: wilham@signtegra.com and wilham.george@gmail.com

ABSTRACT: On the early days of Finite Element Method research, Prof. Zienkiewicz et.al. (1968) in his monumental article, implemented a no-tension material for jointed rock mass (material that cannot withstand tensile stress) into existing Mohr-Coulomb Joint Rock criterion for shear stress analysis. With background from the geologists / geophysicists research between 1960s to 1990s, Papaliangas et.al. (1996) proposed a new breakthrough in joint rock failure criterion, that is the Brittle-Ductile Transition. The old Mohr-Coulomb equation had been used in various rock mechanic problems (Zienkiewicz et.al. 1971, Locat et.al. 2000) and in petroleum engineering / engineering geologists (Hatcher 1995, Aoki et.al. 1993, McLean 1998, Ramsay & 2000), and it does not include the Brittle Ductile Transition element. In this paper, the author tries to implement a new algorithm of Papaliangas into the older Finite Element Method code of Zienkiewicz-Pande (1977), so this assistance can help to solve the rock mechanics problems (in Slope Stability, Tunneling, wellbore stability, etc.). Some examples have been presented. Failure Indices and Failure Algorithm have been proposed and explained.

Keywords: joint rock, Tunneling, Failure Indices, Brittle-Ductile Transition (Papaliangas), Slope Stability, Wellbore Stability

ABSTRAK: Di masa permulaan riset Metode Elemen Hingga Prof. Zienkiewicz dkk. (1968) dalam artikel monumentalnya mengusulkan kriteria kekar/batuan sebagai material yang tidak dapat menahan tegangan tarik (*no-tension material*) kedalam kriteria runtuh kekar Mohr-Coulomb untuk analisa tegangan gesernya. Dengan memakai latar belakang riset dari para ahli geologi / geofisik antara masa 1960-an s/d 1990-an, Papaliangas dkk. (1996) mengusulkan suatu terobosan baru dalam rumus dasar keruntuhan kekar dengan mengimplementasikan pengaruh Transisi Getas-Duktail (*Brittle-Ductile Transition*) pada kekar/batuan. Kriteria runtuh lama (Mohr-Coulomb) yang dipergunakan para pakar mekanika batuan (Zienkiewicz et.al. 1968, Locat dkk. 2000) dan ahli geologi teknik / teknik perminyakan (Hatcher 1995, Aoki dkk. 1993, McLean 1998, Ramsay & 2000) tidak memasukan unsur transisi Getas-Duktail. Penulis mencoba mengimplementasikan algoritma Papaliangas yang baru ini kedalam *code* (listing program Fortran) Metode Elemen Hingga lama dari Zienkiewicz-Pande (1977), sehingga hasilnya diharapkan dapat bermanfaat dalam pemecahan problem-problem mekanika batuan, perencanaan terowongan (*tunneling*), kestabilan lereng dan stabilitas lubang bor (*wellbore stability*). Beberapa contoh telah ditampilkan dan dibandingkan disini. Pengenalan akan Indeks keruntuhan dan algoritma keruntuhan juga diterangkan disini.

Keywords: Kekar/batuan, Penerowongan, Indeks Keruntuhan, kriteria runtuh Brittle-Ductile (Papaliangas), Kestabilan Lereng, Kestabilan Lubang Bor

1. PENDAHULUAN

Banyak pekerjaan teknik sipil dan pertambangan melibatkan pembuatan perkuatan lereng, terowongan dibatuan, seperti terowongan untuk "spillway" bendungan, ruang penyimpanan mesin pembangkit listrik pada bendungan, terowongan pada tambang-tambang. Demikian pula untuk dunia perminyakan, analisa wellbore stability juga sangat penting. Umumnya 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 konstitutif (kriteria runtuh) dari material batuan utuh / berkekar tsb.

Era teknologi informasi telah membawa kita/ para insinyur, kepada era penyelesaian dengan dibantu komputer dan metode numerik dengan berbagai algoritma perhitungan yang kompleks.

Prof. Zienkiewicz et al. (1968) mengusulkan kriteria batuan sebagai material yang tidak dapat menahan tarik (*no-tension material*) dan memakai kriteria runtuh Mohr-Coulomb untuk tegangan gesernya. Papaliangas (1996) melakukan riset-percobaan kekar batuan dan mengusulkan suatu terobosan baru dalam rumus dasar keruntuhan batuan. Tentu saja Papaliangas didukung riset-riset para pakar Geologi dan Geofisik sebelumnya (Greenwood & Williamson 1966, Byerlee 1978, Scholz 1990). Model konstitutif baru Papaliangas segera disambut dengan pemodelan numerik konstitutif dari batuan utuh dan kekar batuan oleh penulis (Papaliangas 1999, Louhenapessy 2000).

Paper ini memperkenalkan algoritma yang diusulkan penulis sebelumnya (Louhenapessy 2000) dan juga memberikan beberapa hasil dari contoh simulasi numerik. Dari studi literatur, kriteria runtuh Mohr-Coulomb yang dipergunakan para pakar mekanika batuan sebelumnya (Zienkiewicz et.al. 1971, Locat dkk. 2000) dan

ahli Geologi Teknik / Teknik Perminyakan (Hatcher 1995, Aoki dkk. 1993, McLean 1987, Ramsay 2000) belum bisa menerapkan fenomena Transisi Getas-Duktail (*brittle-ductile transition*).

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.

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 (*joint rock*).

Berkaitan dengan itu penulis, dalam software Newmo3962_2000, mencoba mengimplementasikan algoritma baru (Louhenapessy 2000), yang diharapkan dapat bermanfaat dalam memecahkan problem-problem mekanika batuan. Beberapa contoh numerik akan ditampilkan dan dibandingkan dalam sub-bab sub-bab berikut ini. Adapun sistematika pembahasan makalah ini dapat digambarkan seperti pada bagan dibawah ini (Gambar 1).

2. KRITERIA RUNTUH LAMA (MOHR COULOMB)

2.1 Kriteria runtuh Mohr-Coulomb

Pemodelan kriteria runtuh Mohr-Coulomb untuk kekar batuan adalah:

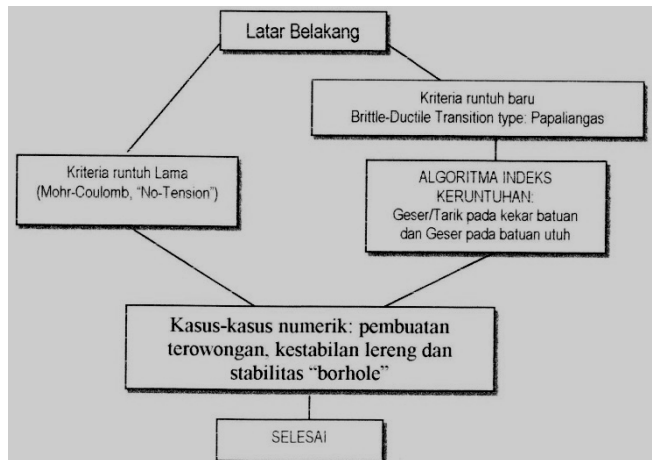
$$F = |\tau_j| + \sigma_n \tan \phi_j = 0 \quad (1)$$

dimana,

ϕ_j = sudut geser kekar batuan (*joint rock friction angle*),

τ_j = tegangan geser pada bidang kekar, dan

σ_n = tegangan normal pada permukaan kekar.



Gambar 1 Sistematika Pembahasan

2.2 Kriteria runtuh Patton

Pada konperensi mekanika batuan pertama di Lisbon, tahun 1966, Patton mengusulkan tambahan sudut dilasional (*dilational*) kedalam sudut geser kekar. Hal ini didapatnya dari studi dan evaluasi yang terperinci dari problem-problem kemiringan lereng (Patton 1966). Patton menunjukkan hubungan langsung antara tegangan geser, τ dan sudut dilasional, i :

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

dimana,

ϕ_r = sudut geser yang tersisa (*residual*) pada kekar batuan,

τ_j = tegangan geser pada bidang kekar, dan

σ_n = tegangan normal pada permukaan kekar.

Sehingga kriteria runtuhnya menjadi :

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

2.3 Kriteria runtuh Barton-Choubey (1977)

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

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

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

3. KRITERIA RUNTUH BRITTLE-DUCTILE (PAPALIANGAS)

Model kriteria runtuh Getas-Daktail untuk kekar batuan yang diusulkan oleh Papaliangas adalah:

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

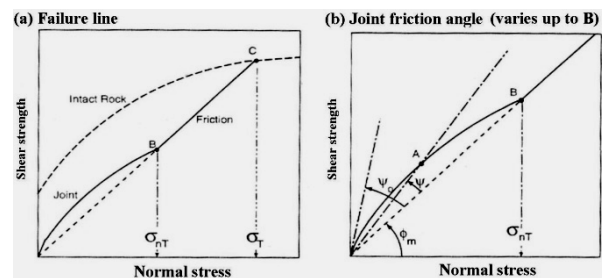
dimana,

$$\tan \psi = \tan \psi_o \frac{\log_{10} \left(\frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n} \right)}{\log_{10} \left(\frac{\sigma_{nT}}{\sigma_{no}} \right)} \quad (5)$$

dan, σ_{no} = tegangan normal (*normal stress*) pada permukaan kekar batuan; ϕ_m = sudut geser dalam pada kekar batuan yang bukan merupakan sudut dilasional (*independent of normal stress*). Lihat Tabel 1; ψ = simbol sudut dilasional pada saat puncak dari tegangan geser; ψ_o = sudut dilasional puncak (maksimum) pada suatu tegangan normal (σ_{no}) yang tidak menyebabkan terjadinya deformasi (*asperity*); σ_{nT} = tegangan normal efektif yang mengakhiri semua sudut dilasional (Gambar 2).

Table 1 ϕ_m , Sudut Geser Dalam pada Kekar yang Bukan Merupakan Sudut Dilasional (Papaliangas dkk. 1996)

Jenis Batuan	Range ϕ_m
Sandstone	Dari 26.2° sampai 41.6°
Limestone	Dari 34.6° sampai 48.6°
Siltstone	Dari 22.5° sampai 36.6°
Granite	Dari 27.7° sampai 37.3°



Gambar 2 Grafik garis runtuh dan sudut geser dalam, ϕ_m (Papaliangas dkk. 1996)

4. KRITERIA RUNTUH BATUAN UTUH

Kriteria runtuh yang dipergunakan untuk batuan utuh adalah Kriteria runtuh Mohr-Coulomb sbb,

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

dimana,

σ_{ni} = tegangan normal pada bidang keruntuhan daidalam batuan utuh,

ϕ_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:

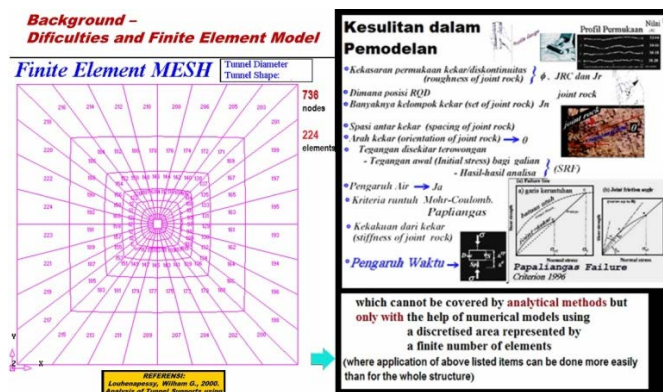
$$F = \bar{\sigma} (\cos \theta + (\sin \theta \sin \phi_o) / \sqrt{3}) - \sigma_m \sin \phi_o - C_o \cos \phi_o = 0 \quad (7)$$

dimana $\bar{\sigma}$, θ dan σ_m adalah komponen-komponen invariant.

5. METODE ELEMEN HINGGA DAN KESULITAN-KESULITAN DALAM PEMODELAN

Kesulitan-kesulitan dalam pemodelan Metode Elemen Hingga, khususnya dalam memodelkan struktur batuan dan struktur didalam batuan, antara lain (Gambar 3):

1. Kesulitan 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. Dip Angle (arah kekar)
5. Tegangan-tegangan/regangan-regangan awal (in-situ stress/strain) disekitar terowongan
6. Pengaruh air (pore pressure)
7. Pengaruh waktu (Rheology of rock)



Gambar 3 Latar Belakang: Kesulitan-kesulitan dalam pemodelan “properties of rock” (Louhenapessy 2000 & Louhenapessy 2017)

6. 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:

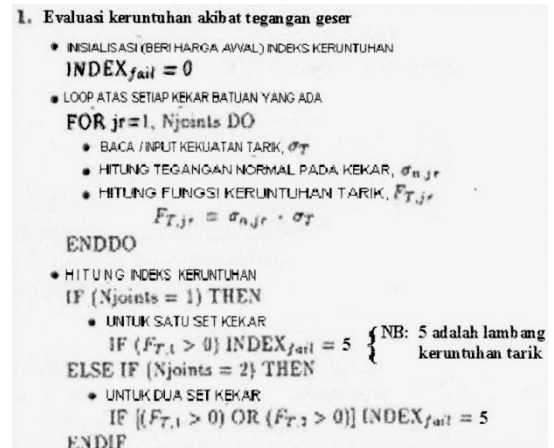
- (a) keruntuhan batuan utuh. Parameter-parameter kuat geser batuan utuh diuji dan diuji pula fungsi runtuhnya: yaitu Persamaan (7), dan
- (b) keruntuhan kekar-kekar batuan: Parameter-parameter kuat geser kekar batuan diuji dan diuji pula fungsi-fungsi runtuhnya: yaitu Persamaan (1), (4) dan (5). Demikian pula,
- (c) kehadiran tegangan tarik dicek.

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 dan 5. Secara detail dapat dilihat pada publikasi lainnya (Louhenapessy 1997, 1998, 2000, 2017). Prosedur ini diulang lagi sampai semua titik buhul (node, dari pemodelan metode elemen hingga) dianalisa.

7. CONTOH NUMERIK

7.1 Terowongan (Tunnels)

Dalam contoh ini sebuah terowongan lingkaran digali pada sebuah kedalaman didalam massa batuan berkekar (jointed rock mass) yang memiliki satu set kekar (one sets of joints). Hal ini ditampilkan untuk contoh perhitungan Indeks Keruntuhan (Failure Indices). Gambar 6 dan Tabel 2 menunjukan geometri dan *material properties* dari contoh numerik ini.



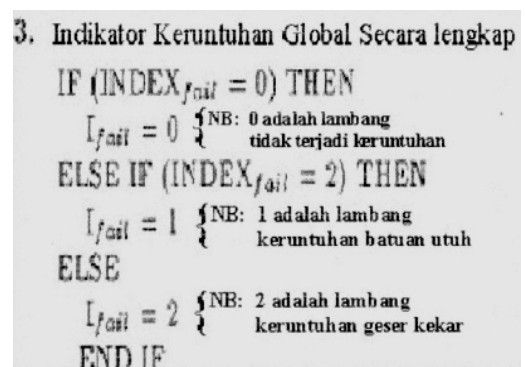
Gambar 4 Algoritma tahap-tahap pengambilan keputusan untuk menghasilkan Indeks Keruntuhan Tarik (Louhenapessy 2000)

2. Evaluate shear failure

- Compute the shear strength of intact rock

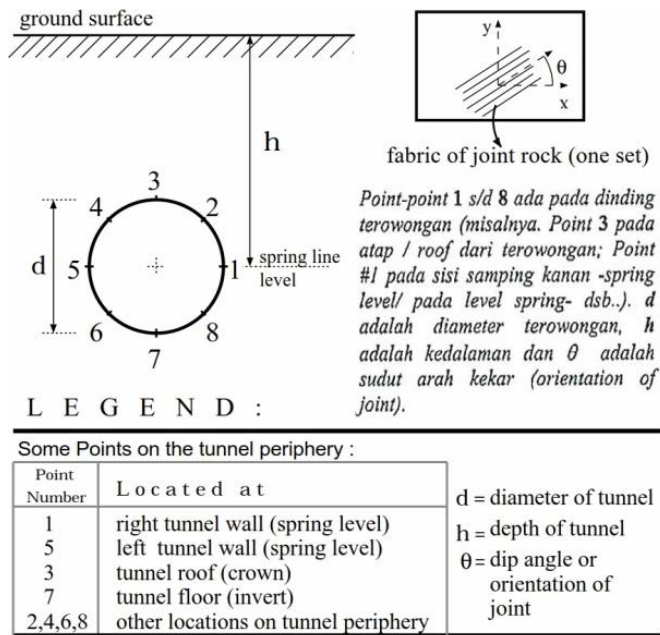
$$F_i = \sigma \left(\cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \sin \phi_i}{\sqrt{3}} \right) - \sigma_m \sin \phi_i - C_i \cos \phi_i$$
- loop over the joints
 FOR jr=1, Njoints DO
 - Compute shear stress on the joint, $\tau_{n,jr}$
 - Compute shear strenght of the joint
 IF (Mohr-Coulomb) $F_{j,jr} = |\tau_n| + \sigma_n \cdot \tan \phi$
 IF (Papaliangas) $F_{j,jr} = |\tau_n| + \sigma_n \cdot \tan (\phi_m + \psi)$
 ENDDO
- Compute failure index
 IF (Njoints = 1) THEN
 - for one set of joints
 IF $(F_{j,1} > 0)$ AND $(F_i \leq 0)$ THEN
 $INDEX_{fail} = INDEX_{fail} + 1$ (joint failure)
 ELSE IF $(F_{j,1} \leq 0)$ AND $(F_i > 0)$ THEN
 $INDEX_{fail} = INDEX_{fail} + 2$ (intact rock failure)
 ELSE IF $(F_{j,1} > 0)$ AND $(F_i > 0)$ THEN
 $INDEX_{fail} = INDEX_{fail} + 3$ (both joint and intact rock failure)
 ENDF
- ELSE IF (Njoints = 2) THEN
 - for two sets of joints
 IF $[(F_{j,1} > 0) \text{ OR } (F_{j,2} > 0)]$ AND $(F_i \leq 0)$ THEN
 $INDEX_{fail} = INDEX_{fail} + 1$ (at least one of the joint failure)
 ELSE IF $[(F_{j,1} \leq 0) \text{ OR } (F_{j,2} \leq 0)]$ AND $(F_i > 0)$ THEN
 $INDEX_{fail} = INDEX_{fail} + 2$ (intact rock failure)
 ELSE IF $[(F_{j,1} > 0) \text{ OR } (F_{j,2} > 0)]$ AND $(F_i > 0)$ THEN
 $INDEX_{fail} = INDEX_{fail} + 3$ (both joint and intact rock failure)
 ENDF

(a)



(b)

Gambar 5 a) Algoritma tahap-tahap pengambilan keputusan untuk menghasilkan Indeks Keruntuhan Kekar Batuan; b) Algoritma tahap-tahap pengambilan keputusan untuk menghasilkan Indeks Keruntuhan Global (Louhenapessy 2000).



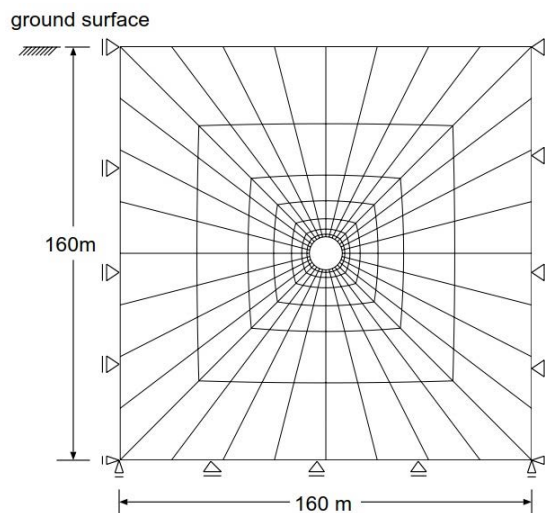
Gambar 6 Geometri Terowongan dan Set Kekar (joint rock)

Table 2 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 ³	Mohr-Coulomb : $\phi = 20^\circ, 30^\circ$, and 40°
	Papaliangas : $\phi_m = 30^\circ$ and 40°
	$\psi_o = 27^\circ$
	$\sigma_{nT} = 10000$ kPa
	$\sigma_{nO} = 1$ kPa

in-situ stress ratio, $K_o = 0.333, 1.0$ and 2.0

Gambar 7 menunjukkan bentuk typical dari Jaring Elemen Hingga (Finite Element Mesh) yang digunakan dalam analisis ini, yang terdiri dari 736 titik buhul (nodes) dan 224 Elemen Isoparametrik ber-buhul-delapan (eight noded isoparametric elements).

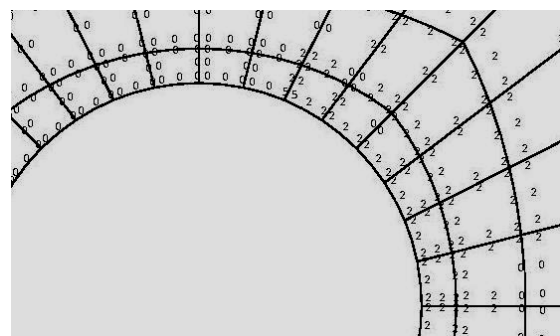


Gambar 7 Jaring Elemen Hingga (Finite Element Mesh)

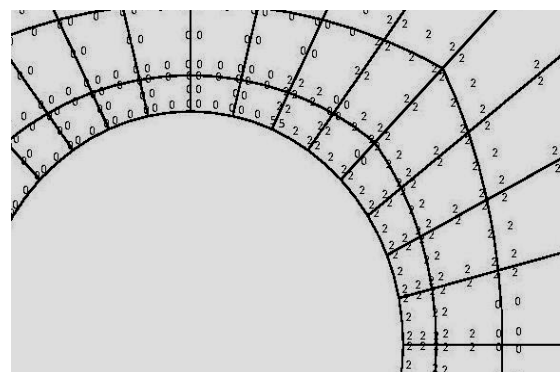
Daerah Indeks keruntuhan (Failure Indices, seperti yang disebut dalam tesisnya W.G. Louhenapessy (2000)) seperti pada Gambar 8 ini dapat dipergunakan dalam perencanaan desain penyangga terowongan. Gambar 8.a s/d Gambar 8.c. menunjukkan daerah Indeks keruntuhan disekitar terowongan untuk bermacam arah kekar, $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ dan 90° dengan memakai kriteria runtuh Papaliangas dengan $\phi_m = 30^\circ$. Simbol-simbol indeks ini ialah:

- “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.

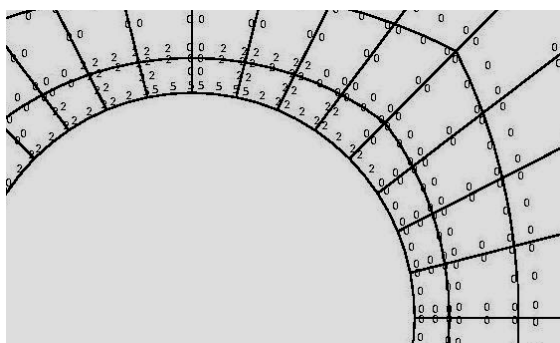
Gambar 8.a menunjukkan Indeks Keruntuhan disekitar dinding terowongan dan terlihat bahwa pada atap (untuk arah kekar batuan, $\theta = 0^\circ$ dan tegangan insitu $K_o = 0.333$) tidak terjadi keruntuhan. Pada hal yang lain, dalam Gambar 8.c, keruntuhan tarik terlihat pada atap dari dinding terowongan (untuk arah kekar batuan, $\theta = 90^\circ$ dan tegangan insitu $K_o = 0.333$). 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. Gambar 8.d. adalah hasil untuk contoh aplikasi Tambang Batubara/Coal Mining (Louhenapessy 2017).



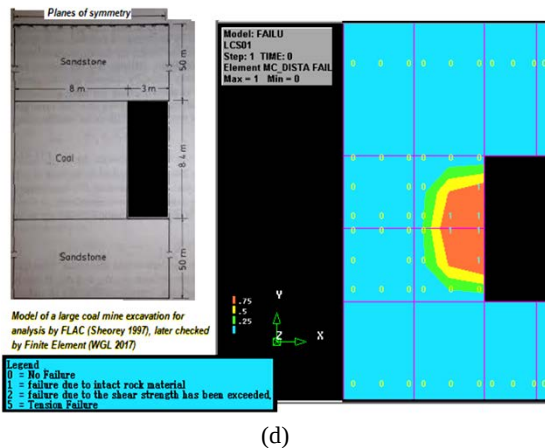
(a)



(b)



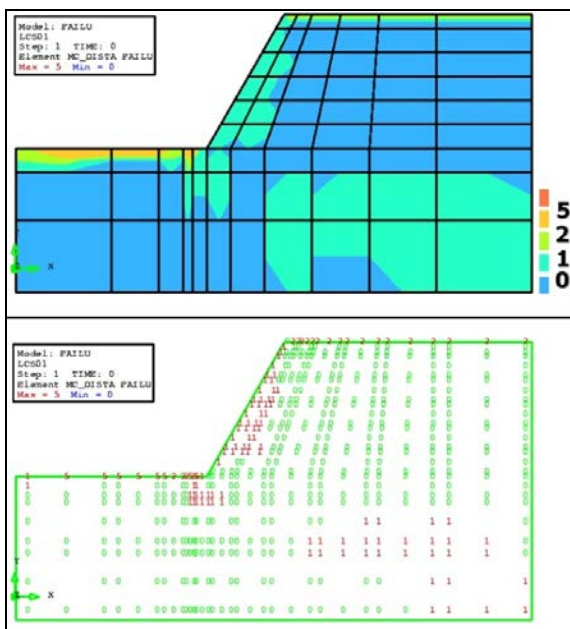
(c)



Gambar 8. (a-c) Identifikasi jenis keruntuhan untuk massa batuan dengan satu set kekar dan berbagai orientasi (arah) kekar. (d) Contoh Untuk Tambang Batubara (Louhenapessy 2017)

7.2 Lereng Batuan Berkekar

Dalam contoh ini, sebuah lereng digali pada massa batuan berkekar (*jointed rockmass*) yang memiliki satu set kekar (*one sets of joints*), dengan arah, $\theta = 15^\circ$. Tinggi lereng dari kaki sampai puncaknya 70 m. Sedangkan rasion tegangan lateral in-situ yang ada adalah $K_0 = 0.333$. Data properti batuan juga diasumsikan sama dengan Tabel 2. Daerah Indeks keruntuhan (*Failure Indices*) seperti pada Gambar 9 ini dapat dipergunakan dalam perencanaan / solusi disain Kestabilan Lereng. Symbol "0" untuk daerah yang tidak runtuh; Symbol "1" untuk daerah runtuh akibat kekuatan batuan utuh terlewati, Symbol "2" untuk daerah runtuh akibat kekuatan geser kekar batuan dilewati, dan, Symbol "5" adalah daerah runtuh akibat kekuatan tarik kekar batuan dilewati.



Gambar 9 Identifikasi jenis keruntuhan untuk massa batuan dengan satu set kekar dan arahnya, $\theta = 15^\circ$. a) Kontur Indeks Keruntuhan, b) Indeks Keruntuhan dalam angka.

Gambar 9 menunjukkan Indeks Keruntuhan disekitar lereng. Tampak pada kaki lereng, keruntuhan yang diakibatkan 'keruntuhan tarik' (simbol Indeks Keruntuhan = 5) mendominasi walaupun ada lokasi- disekitarnya yang terjadi keruntuhan akibat geser (simbol Indeks Keruntuhan = 2). Pada permukaan miring lereng dan juga beberapa meter didalamnya terjadi keruntuhan akibat "keruntuhan batuan utuh terlewati" (simbol Indeks Keruntuhan = 1)..

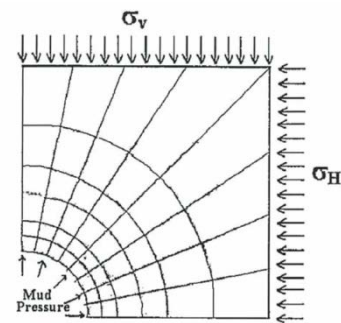
7.3 Stabilitas Borehole (lubang bor) untuk aplikasi Geomekanik

Dalam contoh wellbore stability, Indeks Keruntuhan memegang peranan penting juga. Wellbore stability adalah analisa kestabilan lubang bor pada pekerjaan pengeboran minyak di batuan. Dengan hal ini penulis memakai contoh yang sama dengan contoh numerik dari Aoki dkk. (1993) dengan menggunakan software yang berbeda: yaitu Newmo3962_2000 (Louhenapessy & Pande 2000). Tabel 3 menunjukkan data-data borehole tsb.

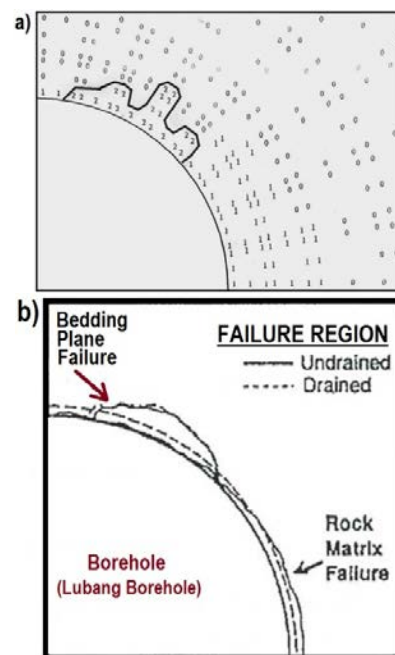
Tabel 3 Data-data untuk analisa Lubang Bor (*Wellbore Stability*)

Kasus	Tegangan In-situ			In-situ Pore Pressure (MPa)	Tegangan Lumpur / Mud Pressure (MPa)
	σ_v (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)		
Horizontal	72	72	54	30	33

Pemodelan numerik dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada *Finite Element Mesh* pada Gambar 10 dan juga terlihat gaya-gaya luar yang bekerja pada sistim borehole tsb. Hasil-hasil analisa dapat dilihat pada Gambar 11. Disini terlihat dimana keruntuhan yag terjadi dan jenisnya. Hal tsb. dibandingkan dengan output dari Aoki dkk. (1993). Terlihat disini hasil dari Algoritma runtuh yang diusulkan overlapping dengan analisa wellbore dari Aoki et.al.



Gambar 10 Mesh Elemen Hingga Untuk Analisa Wellbore Stability



Gambar 11 Hasil-hasil perhitungan analisis "wellbore stability". a) Hasil dari Newmo3962_2000 (Louhenapessy & Pande 2000), b) Hasil dari Aoki et.al (1993).

8. KESIMPULAN

Penjelasan teori-teori kriteria runtuh Papalaiangas (getas-daktail/brittle-ductile), algoritma indeks keruntuhan, indeks keruntuhan pada batuan dengan berbagai arah orientasi kekar, jenis-aplikasi keruntuhan pada analisa kestabilan lereng, terowongan dan kestabilan wellbore (wellbore stability) dalam rekayasa perminyakan/Geomekanik telah disajikan.

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.

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

9. DAFTAR PUSTAKA / REFERENCES

- Aoki, T.; Tan, C.P. and W.E. Bamford (1993) "Effects of Deformation and Strength Anisotropy on Borehole Failures in Saturated Shales", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol 30 (1993), No.7, pp. 1031-1034. Pergamon Press.Ltd. Great Britain.
- Barton, N. dan Choubey, V. (1977) "The shear strength of rock joints in theory and practice"; Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1-54..
- Bieniawski, Z.T. (1990) Engineering rock mass classification. 1st ed. Chichester: Wiley.
- Byerlee, J. (1978) "Friction of Rocks"; Pure and Appl. Geophys. Vol. 116, pp. 615-626.
- Deere, D.U. (1968). "Geological consideration" Pages 1--20 from *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Stagg, K.G., & Zienkiewicz, O.C. (eds), London: John Wiley & Sons.
- Greenwood, J.A. & Williamson, J.B.P (1966) "Contact of nominally flat surfaces. Proc. Royal Society, A. 295, pp. 300-319.
- Hatcher, R.D. (1995) "Structural Geology: Principles Concepts and Problems (2nd Edition)"; Prentice Hall, New York.
- Hoek, E, Kaiser.P.K., & Bawden, W.F. (1995) "Support of Underground Excavations in Hard Rock"; 1 edn. Rotterdam: A.A.Balkem
- 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 Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides. Held in Wales. Thomas Telford Ltd. Great Britain.
- Louhenapessy, Wilham. G. (2017) "Tunnel Support Design With Finite Element Analysis:"; PPT Presentation at The Conference and Exhibition of SUMATRA MINER 2017; 22-23 March 2015, Novotel Hotel, Palembang, South Sumatra, Indonesia .
- Louhenapessy, Wilham. G. (2000) "Analysis of Tunnel Supports using the Finite Element Method"; Ph.D. Thesis. University of Wales Swansea, Swansea, UK.
- Louhenapessy, W, & Pande, G. N. (1997) "A Rational Finite Element Analysis (FEA) Based Procedure for The Analysis of Pressure on Tunnel Supports"; Internal report no: CR/964/97. Department of Civil Engineering: Univ. of Wales, Swansea.
- Louhenapessy, Wilham G. (1998) "A Rational Finite Element Analysis Based Procedure for The Analysis of Pressure on Tunnel Supports"; Pages 236-243 from "Proc. Canadian Soc. Mech. Engineering FORUM 1998", vol. 2. Ryerson Polytechnic University, Toronto.
- Louhenapessy, Wilham G. and Pande, G. N. (2000) "Newmo3962_2000: User's Instruction Manual"; Rep No.CR/1022/00. Civil Eng. Dept., Univ.of Wales Swansea, Swansea, UK.
- McLean (1987) "Numerical Analysis of Well bore Instability"; PhD Thesis University of London, 1987.
- Natau, O, Buhler, M, Keller, S, & Mutschler, T. (1995) "Large scale triaxial test in combination with a FEM analysis for the determination of the properties of a transversal isotropic rock mass"; Pages 635--643 from; Fuji, T (ed), *8th International Congress on Rock Mechanics*, vol. 2. ISRM, Tokyo.
- Oberti, G, Bavestrello, F, Rossi, P, & Flamigni, F. (1986) "Rock Mechanics Investigation, Design and Construction of the Ridracoli Dam"; Rock Mechanics & Rock Engineering, 19, 113--142.
- Palmstrom, A. (1995) "Rmi - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering"; J. of Rock Mech. & Tunnelling Tech.), 1(2), 69--108 [1]
- Pande, G.N., & Williams, J.R. (1990) "Numerical Methods in Rock Mechanics"; Chichester: John Wiley. 327p.
- Papaliangas, T.T., Lumsden, A. and S. Hencher (1996) "Prediction of in situ shear strength of rock joints", In *EUROC'96, Barla (ed.)*, p.143-149, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Papaliangas, T.T. (1999) - *Personal Communication*
- Patton, F.D. (1966) "Multiple modes of shear failure in rock" In Proc. 1st Congress ISRM, Vol. 1. Int. Society of Rock Mechanics, Lisbon.
- Ramsay, J. & Lisle, R.J. (2000) "The Techniques of Modern Structural Geology, Vol 3 ", Academic Press. London
- Scholz, C.H. (1990) "The Mechanics of Earthquake and Faulting, Cambridge", University Press, Cambridge.
- Zienkiewicz, O.C.; Valliappan, 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"; Int. J. Numerical and Analytical Meth. in Geomech., 1 (1), 219--247.