

PENGARUH TEGANGAN DISEKITAR *INCLINE SHAFT* TERHADAP KESTABILAN PENYANGGA PADA TAMBANG BAWAH TANAH

Diana Irmawati Pradani ^[1], Ratih Hardini Kusuma Putri ^[2], Sulfajar Asmaul ^[3]

^[1] Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno-Hatta No. 9 Lowokwaru, Kota Malang

^[2] Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

^[3] PT. Nipindo Primatama

Email: dianapradani@polinema.ac.id

ABSTRAK

Incline shaft merupakan salah satu fasilitas utama dalam suatu pekerjaan tambang bawah tanah yang digunakan sebagai akses menuju panel penambangan. Pada tambang bawah tanah yang mempunyai karakteristik material lemah menjadikan salah satu permasalahan penting geoteknik yang harus diperhatikan. Permasalahan tersebut akan mempengaruhi dalam penentuan dimensi lubang bukaan, metode penggalian serta perkuatan atau penyangga yang akan digunakan. Perlunya dilakukan pendekatan terhadap nilai tegangan disekitar lubang *incline shaft* mengingat bahwa kondisi batuan di alam memiliki sifat heterogen, anisotropi dan diskontinyu. Tahap awal pembuatan lubang *incline shaft* dilakukan pada permukaan tanah (*surface*) atau kedalaman tanah yang relatif dangkal, sehingga tegangan horizontal yang bekerja lebih besar dibanding dengan tegangan vertikal. Proses penggalian ini akan mengubah arah dan besaran tegangan awal yang semula dalam keadaan setimbang menjadi terganggu. Selain tegangan pada massa batuan, kondisi kekuatan tanah yang lemah akan mempengaruhi perilaku dan penyebaran distribusi tegangan yang bekerja disekitar lubang *incline shaft*. Perubahan besar dan arah tegangan akan meningkat ketika mendekati lubang *incline shaft*. Apabila tegangan yang berada di sekitar lubang *incline shaft* melebihi kekuatan batuan, maka akan terjadi ketidakstabilan pada lubang *incline shaft* sehingga perlu dilakukan perkuatan untuk mengontrol tegangan yang ada. Pendekatan secara analitik dan numerik dalam permasalahan ini menggunakan metode elemen hingga dan analisa dua dimensi untuk mendapatkan nilai dan distribusi tegangan di sekitar lubang *incline shaft*.

Kata kunci: *Incline shaft*, tegangan horizontal, distribusi tegangan,

ABSTRACT

Incline shaft is one of the main facilities in an underground mining which is used as access to the mining panel. In underground mines that have weak material characteristics make one of the important geotechnical problems that must be considered. These problems will influence the determination of the opening hole dimensions, the excavation method and the reinforcement or supporting to be used. It is necessary to approach the stress value around the *incline shaft* given that the condition of rocks in nature has heterogeneous, anisotropic and discontinuous properties. The initial stage of making the *incline shaft* is done at the surface of the surface or a relatively shallow depth, so that the horizontal stress that works is greater than the vertical stress. This excavation process will change the direction and amount of the initial stress that was originally in a state of equilibrium to be disturbed. In addition to stresses in rock mass, weak soil strength conditions will affect the behavior and distribution of stress distributions that work around the *incline shaft*. Large changes and the direction of the voltage will increase when approaching the *incline shaft*. If the stress around the *incline shaft* exceeds the strength of the rock, there will be instability in the *incline shaft* hole so that it needs to be strengthened to control the existing stress. Analytical and numerical approaches to this problem use the finite element method and two-dimensional analysis to obtain the value and distribution of stress around the *incline shaft* hole.

Keyword: *Incline shaft*, horizontal stress, distribution stress,

PENDAHULUAN

Secara umum lubang *incline shaft* merupakan akses utama yang digunakan untuk menuju ke panel penambangan. Selain menjadi penghubung antara permukaan tanah (*surface*) dengan panel penambangan fungsi lain lubang *incline shaft* antara lain sebagai akses dalam kegiatan eksplorasi, jalan angkut (manusia, alat, *waste* maupun *ore*), jalur ventilasi dan jaringan penirisan. Dalam proses

pembuatan lubang *incline shaft* akan mengganggu tegangan alamiah yang ada pada massa batuan. Selama dilakukan penggalian pada massa batuan, kondisi tegangan akan berubah secara dramatik karena batuan yang tadinya mengalami tegangan awal dan setelah digali tegangan disekitarnya akan didistribusikan. Dasar pemahaman tentang besar dan arah tegangan *in-situ* dan tegangan terinduksi sangatlah penting dalam proses pembuatan lubang *incline shaft*. Beberapa kasus yang terjadi pada saat

dilakukan penggalian lubang *incline shaft*, tegangan yang terjadi melebihi kekuatan batuan dan menyebabkan ketidakstabilan pada lubang *incline shaft*. Hal ini nantinya berpengaruh pada penentuan tipe penyangga yang akan digunakan dan dari segi keselamatan dan keamanan lubang *incline shaft*.

TINJAUAN UMUM

Tegangan insitu pada suatu titik ditentukan oleh kondisi pembebanan material yang ada di atasnya akibat dari proses geologi yang terjadi sebelumnya. Perubahan kondisi tegangan tegangan *in-situ* dapat diakibatkan oleh beberapa hal antara lain perubahan suhu serta proses kimia seperti *leachin*, penguapan dan rekristalisasi mineral. Kondisi tegangan yang kompleks dan heterogen dihasilkan oleh proses mekanik seperti terbentuknya rekahan, geseran antara bidang rekahan dan aliran viskoplastik dalam material. Beberapa factor yang mempengaruhi kondisi tegangan *in-situ* menurut Brady dan Brown (1985) adalah:

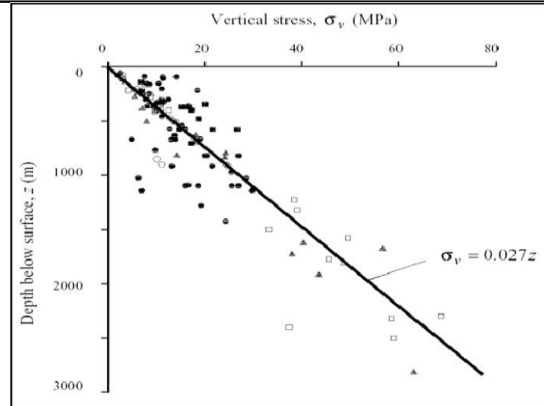
1. Topografi Permukaan
2. Erosi
3. Tegangan Sisa
4. Inklusi
5. Aktivitas Tektonik
6. Bidang Diskontinuitas

Dalam pekerjaan konstruksi sipil maupun tambang, penentuan lokasi pembuatan sebuah lubang bukaan berdasarkan pada arah tegangan utamanya (*principal stress*) regional. Pengukuran tegangan *in-situ* vertikal di sejumlah tambang dan pekerjaan sipil menunjukkan bahwa hubungan ini cukup valid meskipun terdapat penyebaran data yang cukup besar. Cara sederhana yang dapat digunakan untuk mengetahui keadaan tegangan didalam massa batuan tanpa dilakukan pengukuran *in-situ* adalah dengan menganggap bahwa tegangan vertikal (σ_v) pada massa batuan yang berada pada kedalaman tertentu adalah sama dengan berat per satuan luas dari batuan berada di atasnya atau:

$$\sigma = \rho g h \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- σ = tegangan *in-situ* vertikal (Kg/cm²)
- ρ = bobot isi batuan (ton/m³)
- g = percepatan gravitasi (m/det²)
- h = kedalaman (m)



Gambar 1: Hubungan antara Tegangan In-Situ Vertikal dengan Kedalaman (Hoek & Brown,1981)

Hipotesa sederhana yang digunakan dalam memprediksi keadaan duatu tegangan *in-situ* horizontal adalah homogenitas, isotropi dan perilaku (*behavior*) rheologi dari massa batuan. Tegangan *in-situ* horizontal lebih sulit diprediksi dan dilakukan dibandingkan dengan tegangan *in-situ* vertikal. Beberapa kasus dengan kedalaman (h) yang sangat besar, tegangan *in-situ* horizontal menjadi hidrostatis atau litostatis, yaitu $k = 1$ dan $\sigma_h = \sigma_v$. Pendekatan empirik yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya (Brown & Hoek, 1978; Herget, 1988) pada beberapa pekerjaan tambang maupun proyek sipil menunjukkan bahwa nilai k cenderung tinggi pada kedalaman dangkal, dan menurun dengan bertambahnya kedalaman. Selain itu, Terzaghi & Richart (1952) menyatakan bahwa untuk beban gravitasi dimana tidak terjadi regangan dalam arah lateral, nilai k tidak tergantung pada kedalaman dinyatakan sebagai:

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

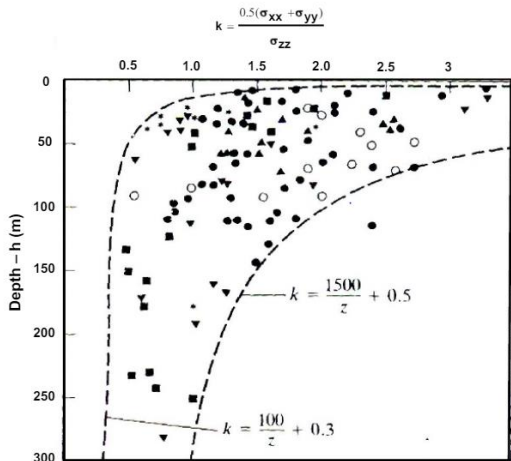
- ν = nisbah poisson massa batuan
- σ_h = $k \sigma_v$

Perhitungan analitik tegangan *in-situ* menunjukkan bahwa dengan menggunakan pendekatan tersebut nilai tegangan *in-situ* horizontal akan selalu lebih kecil daripada tegangan *in-situ* vertikal. Kenyataan dilapangan dengan melakukan pengukuran langsung tegangan *in-situ* horizontal menunjukkan nilai tegangan tidak selalu lebih kecil dari tegangan *in-situ* vertikalnya. Pendekatan ini terbukti tidak valid dan jarang digunakan kembali. Sehingga Sheorey (1994) mengusulkan persamaan sebagai berikut:

$$k = 0.25 + 7 E_h (0.001 + \frac{1}{z}) \dots\dots\dots(3)$$

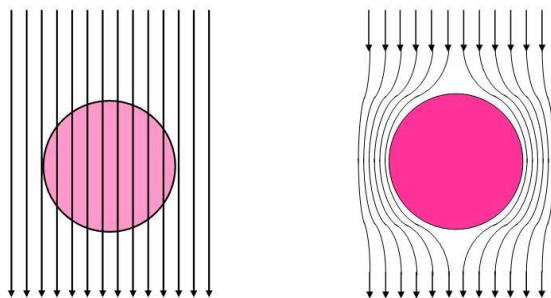
Keterangan:

- E_h = modulus deformasi (GPa)
- z = kedalaman (m)



Gambar 2: Perbandingan Tegangan In-Situ Horizontal Rata-rata terhadap Tegangan In-Situ Vertikal (Hoek and Brown, 1981)

Sebelum dilakukan penggalian, massa batuan berada dalam kondisi detimbang dan setelah dilakukan penggalian kesetimbangan tersebut menjadi terganggu dan dapat mengubah distribusi tegangan awal. Ketika lubang bukaan dibuat pada massa batuan, batuan yang tidak digali menerima beban lebih besar daripada saat sebelum digali. Tegangan awal akan berubah menjadi tegangan terinduksi.



Gambar 3: Ilustrasi Tegangan Utama dalam Sebuah Bidang Paralel dengan Sumbu Lubang Bukaan.

Distribusi tegangan disekitar lubang bukaan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Kirsch (1898). Kirsch (1898) menurunkan persamaan tegangan radial (σ_r), tegan tangensial (σ_θ) dan tegangan geser ($\tau_{r\theta}$) disekitar terowongan dengan penampang lingkaran.

$$\sigma_r = \left[\left(\frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \right) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \dots (4)$$

$$\sigma_\theta = \left[\left(\frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \right) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \dots (5)$$

$$\tau_{r\theta} = \left[- \left(\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \right) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \dots (6)$$

Keterangan:

- σ_r = tegangan radial
- σ_θ = tegangan tangensial

- $\sigma_{r\theta}$ = tegangan geser
- σ_v = tegangan vertikal
- σ_h = tegangan horizontal
- θ = sudut yang dibentuk ke titik pengamatan searah jarum jam
- R = jari-jari lubang bukaan
- r = jarak dari pusat lubang bukaan ke titik pengamatan

Penentuan zona plastis dan deformasi pada lubang bukaan dapat menggunakan persamaan:

$$\frac{d_p}{d_o} = \left(1.25 - 0.625 \frac{p_i}{p_o} \right) \frac{\sigma_{cm}}{p_o} \left(\frac{p_i}{p_o} \right)^{0.57} \dots (7)$$

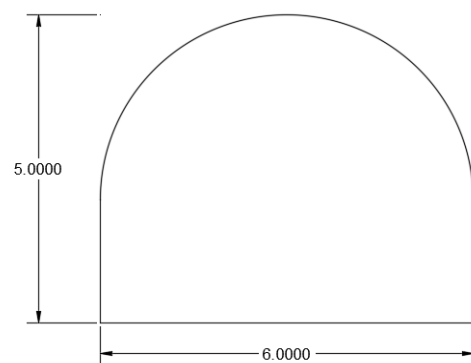
$$\frac{\delta_i}{d_o} = \left(0.002 - 0.0025 \frac{p_i}{p_o} \right) \frac{\sigma_{cm}}{p_o} \left(\frac{2.4 \frac{p_i}{p_o} - 2}{p_o} \right) \dots (8)$$

Keterangan:

- d_p = radius zona plastis
- δ_i = deformasi tunnel sidewall
- d_o = original tunnel radius
- p_i = internal support pressure
- p_o = tegangan horizontal
- θ = in situ stress
- σ_{cm} = rock mass strength

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan lubang *incline shaft* dilakukan pada batuan *claystone* dengan katagori lemah. Lubang *incline shaft* merupakan jalan masuk utama yang akan dibuat dengan kemiringan 14° hingga menembus lapisan batubara dari permukaan. Geometri lubang *incline shaft* yang dibuat memiliki bentuk tapal kuda (*horseshoe*) lebar 6 m dan tinggi 5 m.



Gambar 4: Geometri Lubang Incline Shaft (Tampak Depan)

Kategori massa batuan pada material *claystone* didapatkan dari perhitungan Klasifikasi Massa Batuan/*Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1973) dengan menggunakan lima parameter utama yaitu: nilai kuat batuan, RQD, spasi rekahan, kondisi rekahan dan kondisi air tanah. Dari kelima parameter tersebut didapatkan nilai RMR batuan *claystone* yang digunakan dalam pembuatan lubang *incline shaft* berkisar antara 33 – 51 dan masuk dalam kelas massa batun buruk-sedang. Nilai GSI pada batuan *claystone* didapatkan nilai sebesar 28 – 46 dengan deskripsi batuan *blocky/disturbed/seamy* sedangkan nilai dari *Q-System* sebesar 0,19 – 2,18 masuk dalam kelas batuan *very poor-poor*.

Rock Type: General	SURFACE CONDITIONS					
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR	
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →					
DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80				
	 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70				
	 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60				
	 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	40			
	 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	30	20			
					10	
	N/A	N/A				

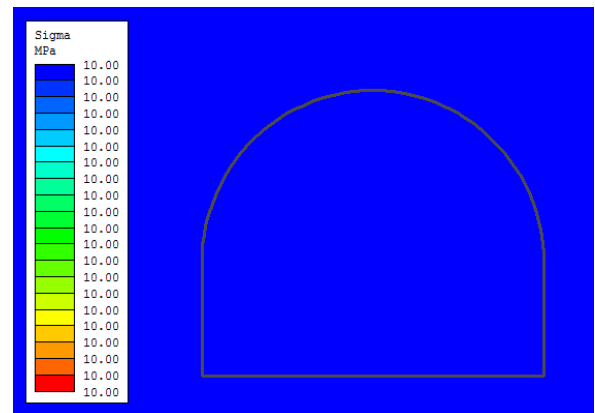
Gambar 5: Nilai Geological Strength Index Batuan Claystone (Hoek and Brown, 1997)

Pengujian sampel batuan *claystone* didapatkan nilai *properties material* yang digunakan dalam menganalisa dua dimensi secara numerik. Proses analisis dua dimensi secara numerik menggunakan program RS2 (*Phase2, Rocscience*). Perhitungan ini digunakan metode elemen hingga (*finite element*) yang dapat digunakan untuk berbagai jenis tanah dan batuan. *Properties material claystone* yang digunakan dalam proses analisis ditunjukkan pada Tabel 1.

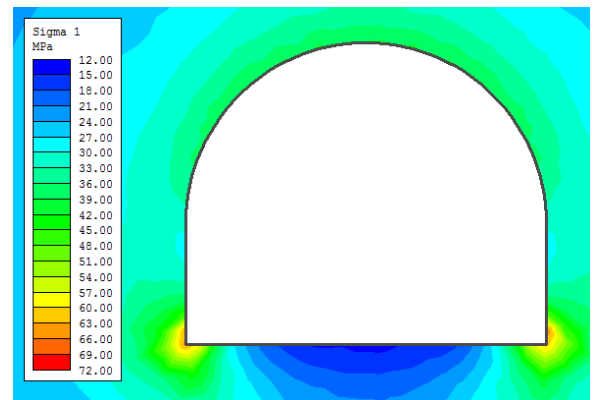
Tabel 1: *Properties Material Claystone*

Claystone		
Unit Weight	MN/m ³	0,027
Poisson's Ratio		0,3
E	Mpa	4213,99
Tensile Strength	Mpa	0,6
Fric.Angle	deg	25,06
Cohesion	MPa	1,27

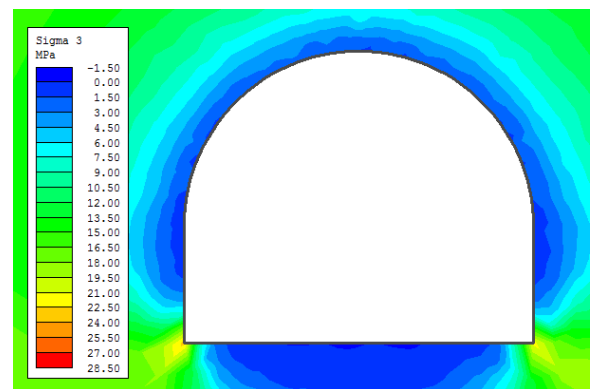
Dari hasil perhitungan numerik 2D dengan menggunakan metode *finite element*, didapatkan nilai sigma satu dan sigma tiga seperti dalam Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6: Nilai Tegangan pada Lubang Incline Shaft Sebelum Penggalan



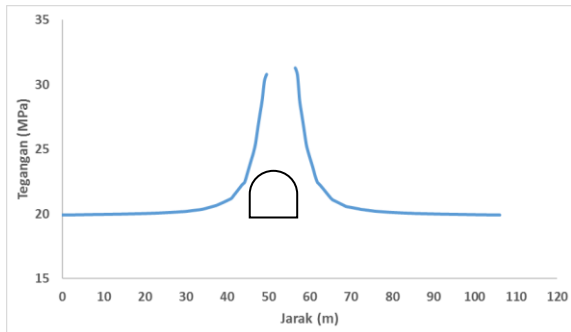
Gambar 7: Nilai Sigma Satu pada Lubang Incline Shaft



Gambar 8: Nilai Sigma Tiga pada Lubang Incline Shaft

Analisis diatas dapat dilihat nilai tegangan pada lubang *incline shaft* sebelum dilakukan penggalian, dalam keadaan stabil dan setimbang. Selama dilakukan penggalian pada batuan *claystone*, kondisi tegangan disekitar lubang *incline shaft* yang pada awal memiliki tegangan secara merata kemudian didistribusikan. Batuan disekitar lubang *incline*

shaft yang tidak ikut tergali akan menerima beban lebih besar karena bagian yang seharusnya menerima beban telah terganggu. Hal ini mengakibatkan adanya tegangan terinduksi. Nilai tegangan horizontal terjadi peningkatan ketika mendekati *face incline shaft*. Semakin menjauhi *face* nilai tegangan akan menurun dan mendekati nilai tegangan massa batuan.

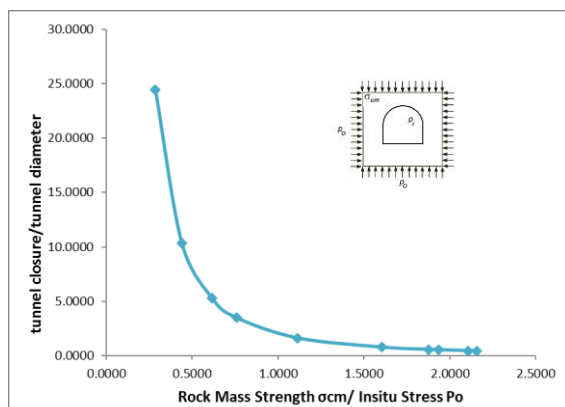


Gambar 9: Distribusi Tegangan Disekitar Lubang Incline Shaft

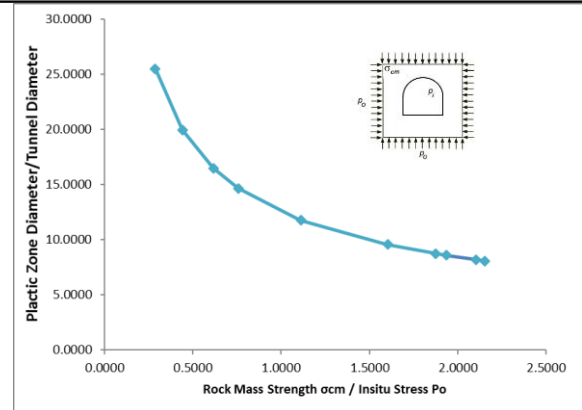
Penentuan zona plastis dan besaran deformasi pada lubang *incline shaft* menggunakan persamaan (7) dan (8) didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 2: Hasil Perhitungan Deformasi Incline Shaft

No	Sec	H	σ_{cm}/P_o	dp/d_o	$\delta i/d_o$
1	1-A	100	0.286	25.507	24.426
2	1-B	100	0.440	19.960	10.332
3	2-A	100	0.616	16.469	5.262
4	2-B	100	0.758	14.642	3.484
5	3-A	100	1.112	11.768	1.618
6	3-B	100	1.604	9.549	0.777
7	4-A	100	1.876	8.734	0.569
8	4-B	100	1.936	8.579	0.534
9	5-A	100	2.104	8.180	0.452
10	5-B	100	2.155	8.069	0.431



Gambar 10: Grafik Deformasi Incline Shaft Terhadap Tegangan Insitu



Gambar 11: Grafik Zona Plastis Terhadap Diameter Incline Shaft

KESIMPULAN

Nilai tegangan akan mengalami peningkatan baik tegangan horizontal maupun tegangan vertical pada saat terjadi pengalihan. Penyebab meningkatnya tegangan yang terjadi disekitar lubang *incline shaft* dikarenakan beban yang semula ditanggung secara merata berpindah dan didistribusi. Hasil analisis 2D menggunakan metode *finite element*, arah redistribusi tegangan sebagian besar menuju ke *side wall* sehingga perlu adanya perhatian lebih pada *side wall* agar tidak terjadi keruntuhan maupun pengangkatan lantai lubang *incline shaft*. Nilai tegangan maksimum terdapat pada *side-right wall* lubang *incline shaft* sebesar 65,41 MPa. Besaran tegangan pada zona plastis didapatkan nilai 25,51 MPa dan apabila tegangan terinduksi memiliki besaran melebihi nilai maksimum zona plastis maka akan terjadi ketidakstabilan. Berdasarkan hasil analisa dari perhitungan deformasi lubang *incline shaft* serta arah distribusi tegangan, rekomendasi desain penyangga untuk batuan lemah dapat digunakan steel rib dengan kombinasi *concrete/shotcrete lining*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bieniawski, Z.T., 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. Boston: A.A. Balkema.
 Brady, B.H.G. and Brown, E.T., 1985, *Rock Mechanics for Underground Mining*. London: Allen and Unwin.

- Galvin, J.M., 2016, *Ground Engineering-Principles and Practices for Underground Coal Mining*. New York: Springer Cham Heidelberg
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980. *Underground Excavations in Rock*. London: Instt. Min Metall
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1997, *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, pp1165-1186.
- Hoek, E., 1998, *Tunnel Support in Weak Rock*. Keynote Address, Symp. On Sedimentary Rock Engineering, Taipei.
- Kirsch, G., 1898, *Die Theorie der Elastizität und die Dedufhisse der Fertigeirslehre*, *Zeitschrift der Vereines Deutscher Ingenieure*, 42, 797
- Nikumbh, R. K. and Karra, R. C. 2017. *Analysis of Stresses Around a Tunnel Opening*. 6th Internasional Engineering Symposium-IES, Japan
- Sakurai, S., 1983, *Displacement Measurements Associated with The Design of Underground Openings*, Proc. Int. Symposium Field Measurement in Geomechanics, Zurich 2, pp1163-1178.