

ANALISIS KESTABILAN TEROWONGAN PADA TUNNEL # 11 KERETA CEPAT JAKARTA – BANDUNG DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

ustianto Aprig^{1*}, and zakri Rizto Salia^{1**}

¹Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

*aprigust46@gmail.com

**riztoszakri@ft.unp.ac.id

Abstract. Tunnel 11 has total length of 1,1 km. the shape of tunnel 11 was horseshoe with 15 meters wide and 13 meter high. Form classification rock mass rating (RMR) analysis, excavation recommendation on tunnel 11 by using full face method. Whereas actual excavation in the field with top heading and benching method. Based on the alignment required a plan of tunnel stability by using finite element. Analysis of tunnel's stability using a full face excavation method based on RMR value. Tunnel stability with method of digging the top heading and bench and the optimized buffer based on the simulation carried out. The tunnel's stability analysis is reviewed by the strenght factor and displacement value in the tunnel Based on analysis with full face excavation method, on the left wall with no suport it's got the lowest strenght factor value that is 6,3 and biggest displacement value that is 1,69 cm. with excavation on lower left side of the wall without support there was the smallest value of factor that is 5,2 and the biggest displacement value is 1,7 cm. strenght factor value by using full face excavation with top heading and benching threshold value strenght factor according to the KEPMEN 1827K/MEM/2018 and threshold deformation value according to japan society engineers (JSCE) based on a modeling simulation of the tunnel's stability from economic side and stability analysis, then the optimal insulation on tunnel 11 is shotcrete K-175 #10 mm with top heading and benching excavation.

Keyword : tunnel stability, finite element method, top heading and benching, strenght factor, displacement.

1. Pendahuluan

Pembangunan kereta cepat Jakarta bandung merupakan salah satu proyek nasional yang dikelola oleh PT Kereta Cepat Indonesia Cina (KCIC). Pembangunan ini menghubungkan ibu kota Jakarta dengan kota bandung dengan jarak membentang sejauh 150 km. Jalur pembangunan kereta cepat ini dimulai 0 km dari Jakarta sampai ke kota bandung. Pembangunan ini dimulai sejak 2015 dan ditargetkan rampung pada tahun 2022. Pembangunan struktur *trase* atau jalur kereta cepat menggunakan *grider box* dan terowongan bawah tanah (*underground tunneling*).

Pembangunan terowongan kereta cepat Jakarta bandung terdiri dari 13 terowongan, salah satu pembangunan terowongan kereta cepat Jakarta bandung adalah terowongan 11 yang menembus bukit bohong yang terletak di padalarang, kabupaten bandung barat. Terowongan ini memiliki panjang total 1,1 km dengan bentuk penampang berupa tapal kuda dengan lebar 15 meter dan tinggi 13 meter.

Dari analisis klasifikasi *rock mass rating* (RMR) pada terowongan 11, didapatkan nilai RMR 78. Sehingga batuan pada terowongan 11 termasuk batuan kelas II. Berdasarkan tabel klasifikasi Bieniawski 1989 tentang petunjuk penggalian dan penyanggan terowongan dengan bentang 10 meter berdasarkan nilai RMR. Penggalian pada terowongan 11 menggunakan metoda penggalian *Full Face*.

Sedangkan kondisi aktual dilapangan metoda penggalian yang digunakan adalah metoda *top Heading and benching*, dengan penggalian secara bertahap yang terdiri dari 3 bagian yaitu *top heading*, *middle* dan *lower*. Metoda konstruksi yang digunakan pada penggalian terowongan 11 adalah *new austrian tunneling method* (NATM). Dimana metode NATM digunakan pada penggalian terowongan yang lebar dan dalam untuk mencegah terjadinya potensi *deformasi* pada lubang bukaan. Penggalian kemajuan pada terowongan 11 menggunakan penggalian dengan cara peledakan dan pemboran serta penggalian mekanis.

Setiap dilakukan /penggalian pada *top heading*, *middle* dan *lower* akan berpotensi terjadi nya *deformasi* yang mempengaruhi kestabilan terowongan. *Deformasi* yang terjadi diakibatkan dari penggalian lubang bukaan yang dalam dan lebar. Sehingga akan menimbulkan tegangan dan regangan yang besar sekitar lubang bukaan. *Deformasi* pada terowongan akan menyebabkan terjadinya runtuh pada saat melakukan penggalian.

Pemilihan DK 113+630 tempat pengamatan penelitian karna adanya proses penggalian lubang maju dan pelebaran terowongan yang akan dilakukan pemasangan *final lining*. Sebelum pemasangan *final lining*, lubang bukaan di berikan penyanggan berupa *shotcrete* dan *wiremesh*. Pemasangan *shotcrete* dan *wiremesh* berguna untuk menjaga kestabilan terowongan saat dilakukan

penggalian lubang maju. Lokasi penelitian terletak pada kedalaman 67 m dengan jarak dari poros miring 570 m.

Sehingga diperlukan rancangan permodelan secara numerik dalam pembuatan terowongan untuk memprediksi kestabilan terowongan sebelum terpasangnya *final lining*. Permodelan dilakukan untuk melihat kondisi terowongan sebelum dilakukan penyanggan dan setelah dilakukan penyanggan. Kestabilan pada terowongan dilihat dari *deformasi* dan *strength factor* disekitar lubang bukaan. Pembuatan model terowongan harus sesuai dengan kondisi batuan, struktur geologi, dan kaidah geologi teknik yang baik.

Dengan adanya permasalahan tersebut diperlukan suatu kajian geoteknik terhadap kestabilan terowongan menggunakan metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM) dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Berdasarkan uraian dari permasalahan tersebut penulis tertarik melakukan kajian dengan judul “**Analisis Kestabilan Terowongan #11 Kereta Cepat Jakarta Bandung Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga**”.



Gambar 1. Dimensi Terowongan 11

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Terowongan

Terowongan adalah bangunan lubang tembusan bawah permukaan yang menembus bantala/*ground* yang terdiri tanah atau batuan dari gunung, sungai, bawah jalan, dan lain-lain dengan fungsi sebagai jalan raya, jalan KA, jalan air, dan sebagainya (Kementerian PU, 2011). Sedangkan menurut Tibri (2017), terowongan didefinisikan sebagai lubang bukaan yang dibuat dengan dua lubang bukaan yang saling berhubungan langsung atau dengan kata lain kedua lubang bukaan tersebut harus menembus bagian kerak bumi

2.2 Klasifikasi Rock Mass Rating (RMR)

Tujuan dari sistem RMR adalah untuk mengklasifikasi kualitas massa batuan dengan menggunakan data permukaan, unuk memandu metode penggalian dan juga untuk memberikan rekomendasi penggalian menggunakan perkuatan sementara atau permanen.

Dalam mengklasifikasi massa batuan berdasarkan sistem RMR, Bieniawski mengguakan parameter utama, yaitu:

1. *Uniaxial Compressive Strenght* (UCS).
2. *Rock Quality Designation* (RQD).

3. Kondisi kekar (*Condition of discontinuities*).
4. Kondisi air tanah (*Groundwater conditions*).
5. Jarak antar kekas (*Spacing of discontinuities*).
6. Orientasi kekas (*Orientation of discontinuities*).

2.3 Metoda Penggalian Pada Terowongan

Metoda penggalian pada terowongan terdiri dari

2.3.1. Full Face

Metoda *full face* adalah salah satu metode penggalian pada terowongan dimana seluruh penampang terowongan digali secara bersamaan. Metoda ini cocok diterapkan pada terowongan yang memiliki penampang melintang kecil hingga terowongan dengan diameter 3 meter.

2.3.2. Top Heading and Benching

Metoda *heading and banch* adalah salah satu cara penggalian pada terowongan dimana bagian atas penampang terowongan digali terlebih dahulu sebelum bagian bawah penampangnya. Setelah penggalian penampang atas mencapai 3 – 3,5 meter (*heading*), dilanjutkan engan penggalian penampang bawah (*bench cut*) sampai membentuk penampang terowongan yang di rencang.

2.3.3. Center Drift

Metoda *center drift* adalah salah satu metoda penggalian pada terowongan dimulai dengan penggalian lubang berukuran 2,5 m x 2,5 m – 3,5 m – 3,5 m dari portal ke portal. Setelah itu dilanjutkan perluasan penggalian pada terowongan setelah *center drift* selesai

2.3.4. Side Drift

Side drift adalah salah satu metoda penggalian pada terowongan dimana metoda ini memiliki 2 *drift* digali sekaligus pada sisi – sisi penmpang, sepanjang lintasan terowongan. Selanjutnya dilakuakn penggalian bagian *arch* yang diikuti dengan pemasangan penyangga sementara.

2.4 Sistem Penyanggan Pada Terowongan

2.4.1. Shotcrete

Shotcrete merupakan bahan pelapis dinding terowongan yang terbuat dari komposit agregat dan semen dengan campuran bahan aditif yang berfungsi sebagai perkuatan terowongan. Shotcrete yang digunakan pada terowongan 11 adalah shotcrete tipe K-400

Beton yang digunakan pada terowongan 11 adalah beton ready mix dengan mutu K-400. Untuk mendapatkan parameter kuat tekan dan *modulus elastisitas* berdasarkan mutu beton seperti persamaan berikut (SNI 2013)

Rumus konversi mutu beton menjadi kuat tekan

$$F_c = K \times 0,83 \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

F_c = Kuat tekan (MPa)

K = Mutu beton

0,83 = konversi ke MPa

Rumus modulus elastisitas

$$E = 4700 \sqrt{f_c} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

E = Modulus elastisitas

F_c = Kuat tekan (MPa)



Gambar 2. Penyangga Shotcrete K-400 Pada Terowongan 11

2.4.2. Wiremesh

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 untuk mengikat material batuan yang kecil dan menahannya agar tidak jatuh. *Wiremesh* yang digunakan pada terowongan 11 ada wiremesh dengan diameter 10 mm.

2.4.3. Steel Sheet

Salah satu penyangga baja (*steel set*) berupa jenis besi H, yaitu H *beam* yang merupakan penyangga pasif dan penyangga sekunder. Setiap set H *beam* memiliki kekuatan 32 ton yang terdiri dari 1 buah H Beam sebagai cap dengan kekuatan 28 ton dan 2 buah H beam sebagai post dibagian kiri - kanan dengan jumlah kekuatan 5,2 ton

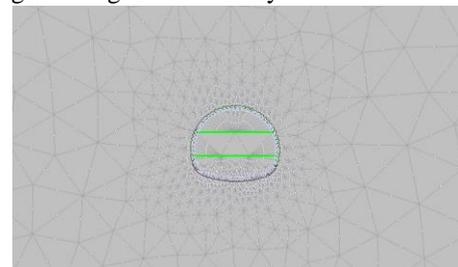
2.5. Pengujian Pada Batuan

Dalam mempelajari aspek kekuatan batuan (mekanika batuan, geomekanika dan lain sebagainya) diperlukan klasifikasi geomekanika. 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 (Ambarini, 2015). Pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan parameter batuan adalah

- a. **Sifat fisik batuan** seperti massa jenis, “*specific gravity*”, *porositas*, “*void ratio*”, *absorpsi*, bobot isi batuan, dll.
- b. **Sifat mekanik batuan** seperti kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, “*poisson’s ratio*”, sudut geser dalam, kohesi, dan lain sebagainya.

2.6. Permodelan Dengan Metoda Elemen Hingga

Metoda elemen hingga adalah salah satu metoda numerik yang menggunakan pendekatan differensial. Metoda ini dapat digunakan untuk menganalisis kondisi tegangan dan regangan pada suatu struktur batuan yang sangat kompleks. Prinsip dasar perhitungannya adalah dengan cara membagi suatu media continuum menjadi beberapa elemen yang lebih kecil (*diskretize*). Elemen yang lebih kecil ini merupakan elemen berhingga dan umumnya memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan dengan continumnya.



Gambar 3. Mesh dengan Elemen Hingga untuk Program Phase2

2.7. Faktor Keamanan Secara Analitik

Nilai faktor keamanan (FK) dapat dihitung dengan menggunakan kriteria Mohr-Coulumb yang mempertimbangkan tegangan principal batuan..

$$FK = \frac{(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{c}{\tan \theta}) \times \sin \theta}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

FK = Faktor Keamanan

σ₁ = Sigma 1

σ₃ = Sigma 3

C = Kohesi

θ = Sudut geser dalam

2.8. Analisis Kestabilan Terowongan Secara Numerik

2.8.1. Strenght Factor

Strenght factor adalah nilai yang dihitung dengan membagi kekuatan batuan dengan tegangan terinduksi pada titik dalam mesh. Kekuatan batuan yang dimaksud tergantung dari kriteria keruntuhan yang digunakan dan tegangan yang muncul akibat pengaruh kegiatan penggalian sekitar lubang bukaan

2.8.2. Displacement

Displacement tanah adalah pemindahan tanah karena adanya kegiatan- kegiatan yang dilakukan sehingga

menimbulkan tegangan pada tanah. *Displacement* pada batuan terjadi karena hilangnya efek confining akibat penggalian. *Displacement* ini terjadi dengan pola tertentu terhadap arah radial dan tangensial. Besarnya dipengaruhi antara lain oleh kombinasi nilai gaya vertikal dan horizontal serta properti dari batuan.

2.9. Phase 2

Phase 2 adalah program analisis tegangan elemen hingga 2D *elasto-plastik* 2D yang kuat untuk penggalian bawah tanah atau permukaan batuan maupun tanah. Program ini dapat digunakan untuk berbagai proyek rekayasa dan mencakup desain dukungan, stabilitas lereng elemen hingga, rembesan air tanah, dan analisis probabilistic.

3. Metodologi Penelitian

3.1 Jenis Penelitian

Berdasarkan jenis data yang akan diperoleh maka penelitian ini tergolong kedalam penelitian terapan (*Applied Research*). Penelitian terapan merupakan jenis penelitian yang menekankan pada ilmu – ilmu teoritis yang diterapkan dilapangan untuk menyelesaikan masalah yang terjadi. Menurut Yusuf (2005) penelitian terapan adalah penelitian yang lebih menekankan pada penerapan ilmu, aplikasi ilmu, ataupun penggunaan ilmu untuk dan dalam masyarakat, ataupun untuk keperluan tertentu (industry, usaha dll).

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan pada terowongan 11 kereta cepat Jakarta Bandung, dari PT LAPI ITB dan dari referensi jurnal yang relevan. Adapun tahapan pengumpulan data dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Tahap persiapan dimana pada tahap ini dilakukan studi literatur terhadap laporan penelitian sebelumnya maupun buku-buku penunjang yang berhubungan dengan pelaksanaan kegiatan penelitian
2. Pengukuran dimensi terowongan 11 kereta cepat Jakarta Bandung
3. Pengukuran kekar atau bidang lemah sekitar lubang bukaan terowongan 11 pada DK 115 + 570
4. Pengumpulan data pengukuran parameter batuan penelitian di PT LAPI ITB yang terdiri dari sifat fisik batuan, kuat tekan batuan, modulus young, kohesi, sudut geser dalam dan poisson ratio.
5. Pengumpulan data parameter penyangga pada terowongan 11 seperti lebar shotcrete, tipe shotcrete dan diameter wiremesh
6. Membuat permodelan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) pada terowongan 11 dengan menggunakan software phase 2 sesuai kondisi aktual dilapangan dan berdasarkan nilai RMR.

3.3 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan metoda elemen hingga pada software rockscience phase 2. Analisis tersebut membandingkan kestabilan terowongan berdasarkan rekomendasi dari nilai *rock mass rating* (RMR) dengan Kondisi aktual dilapangan sebelum dan sesudah dipasang penyanggaan. Analisis kestabilan terowongan ditinjau dari nilai *strength factor*/faktor keamanan dan *displacement*.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Data Terowongan

Data yang didapatkan berupa data primer dan sekunder. Data tersebut berupa dimensi terowongan, parameter batuan, klasifikasi RMR parameter shotcrete, parameter wiremesh dll. Data yang didapatkan digunakan dalam proses pembuatan permodelan pada terowongan 11

4.1.1. Data parameter batuan

Data parameter batuan dari uji laboratorium institute teknologi Bandung (ITB) yang dilakukan oleh PT. LAPI ITB. Data yang didapatkan adalah dari pengujian yang dilakukan oleh perusahaan seperti table 1

Table 1. parameter batuan terowongan 11

| Parameter | Simbol | Andesite | Satuan |
|----------------------|------------|----------|-------------------|
| Densitas | ρ | 1,973 | Kg/m ³ |
| Kuat Tekan Uniaksial | σ_c | 32 | MPa |
| Modulus Young | E | 4924 | MPa |
| Nisbah Poisson | ν | 0,22 | - |
| Kohesi | c | 9,2 | MPa |
| Sudut Geser Dalam | ϕ | 37 |° |
| Kuat Tarik Uniaksial | σ_t | 2,7 | MPa |

4.1.2. Dimensi terowongan

Dimensi terowongan didapatkan dari pengukuran dilapangan berupa lebar dan tinggi terowongan. Penggalian terowongan 11 terdiri dari 3 stage penggalian yaitu, *top heading*, *middle* dan *lower*. Dimensi terowongan 11 total terdiri dari lebar 15 meter dan tinggi 13 meter seperti table 2

Table 2. dimensi terowongan 11

| No | Stage | Lebar | Tinggi |
|----|-------------|-------|--------|
| 1 | Top Heading | 13,9 | 4,4 |
| 2 | Middle | 15 | 4,2 |
| 3 | Lower | 14,5 | 4,4 |

4.1.3. Klasifikasi Rock Mass Rating

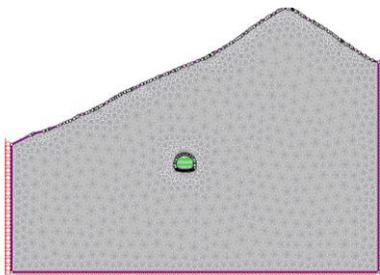
Klasifikasi *rock mass rating* didapatkan dari pengukuran dilapangan. Dari hasil pengukuran didapatkan nilai RMR 78. Dari nilai RMR batuan pada terowongan 11 termasuk batuan kelas II seperti table 3

Table 3. Klasifikasi Rock Mass Rating

| Parameter | | |
|---------------------|--------------------|-----------|
| | Nilai | Bobot |
| UCS | 60 | 7 |
| RQD | 90,8 | 20 |
| Joint spacing | 0,22 | 10 |
| Join persistence | <1 | 6 |
| Joint aperture | None | 6 |
| roughness | Rought | 5 |
| Infilling | None | 6 |
| Weathering | Slightly weathered | 5 |
| Ground water | Wet | 15 |
| Strike orientation | Favourable | -2 |
| Jumlah | | 78 |
| Kelas batuan | | II |

4.2 Permodelan Terowongan 11 Pada Phase 2

Setelah didapatkan data parameter input dalam permodelan di phase 2. Dilakukan permodelan terowongan 11 dengan menggunakan ground actual surface seperti gambar 4.



Gambar 4. Permodelan Terowongan 11 Pada Phase 2

4.3 Rancangan Terowongan Berdasarkan Nilai RMR

Berdasarkan analisis nilai *rock mess rating* (RMR) pada terowongan 11, didapatkan nilai RMR 78. Berdasarkan tabel Bieniawski 1989 mengenai rekomendasi penggalian dan penyanggaan terowongan dengan penampang 10 m. maka pada terowongan 11 termasuk batuan kelas II dengan rekomendasi penggalian terowongan dengan metoda *full face*.

4.4.1. Analisis Kestabilan Terowongan Pada Penggalian Full Face tanpa penyangga

Berdasarkan analisis kestabilan terowongan secara numerik dengan metoda elemen hingga pada phase 2. Didapatkan nilai sigma 1 dan nilai sigma 3 pada pada saat penggalian. Sehingga dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik untuk mendapatkan hasil faktor keamanan sama dengan *Strenght factor* berdasarkan persamaan 3

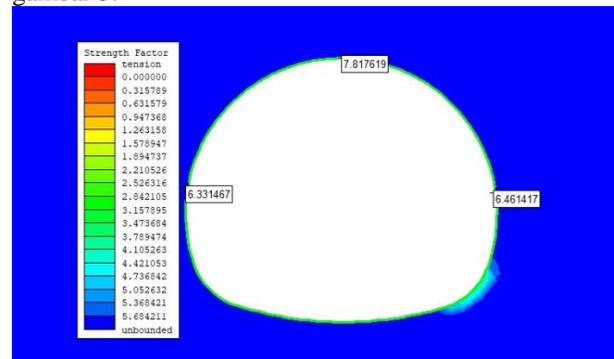
$$FK = \frac{(1,124303 + 12,208812) \times 0,601815}{1,011346}$$

$$FK = 7,934049$$

Tabel 4. Faktor keamanan secara analitik pada Penggalian Full Face tanpa penyangga

| Bagian | c | φ | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamana n (FK) |
|-----------------|-----|----|--------------|--------------|-----------------------|
| Atap | 9,2 | 37 | 2,13564 9 | 0,11295 7 | 7,817619 |
| Dinding g Kanan | 9,2 | 37 | 2,74932 2 | 0,13563 3 | 6,331467 |
| Dinding g Kiri | 9,2 | 37 | 2,67216 4 | 0,14700 6 | 6,461417 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strenght factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 5.



Gambar 5. Nilai Strenght factor pada penggalian full face tanpa penyangga

Dari analisis kestabilan terowongan secara numerik didapatkan nilai *displacement* yang terdiri dari nilai *horizontal displacement* dan *vertical displacement*. Seperti tabel 5

Tabel 5. Nilai *horizontal displacement* dan *vertical displacement* pada penggalian full face tanpa penyangga

| Bagian | Total displacement (m) |
|---------------|------------------------|
| Atap | 0,002598 |
| Dinding Kanan | 0,012983 |
| Dinding Kiri | 0,016964 |

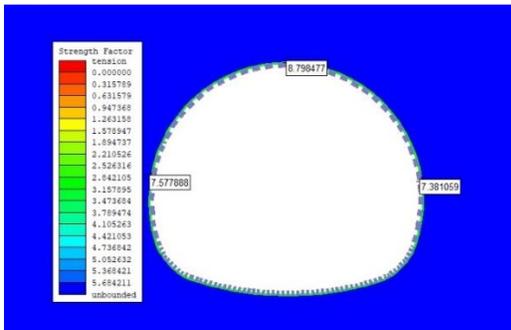
4.4.2. Analisis kestabilan terowongan pada penggalian full face dengan penyangga shotcrete K-400 #10 mm

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada penggalian *full face* dengan menggunakan penyangga *shotcrete* K-400 #10 mm. didapatkan nilai faktor keamanan / *Strenght Factor* pada terowongan seperti tabel 6.

Tabel 6. Nilai strength faktor pada penggalian *full face* dengan penyangga

| Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|---------------|----------|----------|----------------------|
| Atap | 2,044674 | 0,244509 | 8,798477 |
| Dinding Kanan | 2,508122 | 0,329148 | 7,577888 |
| Dinding Kiri | 2,515151 | 0,305989 | 7,381059 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 6



Gambar 6. Nilai *Strenght Factor* Penggalian *Full Face* dengan Penyangga

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada penggalian *full face* dengan menggunakan penyangga dan tanpa penyangga. nilai *strength factor* pada terowongan mengalami kenaikan saat dilakukan penyangga. maka penyanggaan yang diberikan dapat membuat terowongan lebih stabil. Hal ini dikarenakan penggunaan penyangga dapat mengurangi tegangan pada terowongan.

Dari analisis secara numerik pada penggalian *full face* dengan menggunakan penyangga. didapatkan nilai *displacement* pada terowongan seperti tabel 7.

Tabel 7. Nilai *Horizontal displacement* dan *vertical displacement* pada penggalian *full face* dengan penyangga

| Bagian | Total displacement (m) |
|---------------|------------------------|
| Atap | 0,002154 |
| Dinding Kanan | 0,013333 |
| Dinding Kiri | 0,016630 |

Setelah dilakuakan penyanggaan pada *penggalian full face*, didapatkan nilai *displacementnya*. Nilai *displacement* mengalami penurunan pada atap dan dinding kiri. Sedangkan pada dinding kanan mengalami kenaikan sebesar 0,035 cm.

Berdasarkan KEPMEN 1827K/MEM/30/2018 tentang ambang batas faktor keamanan yang diperbolehkan untuk terowongan *fix facility* adalah 2.0. maka dari itu nilai faktor keamanan pada terowongan 11 menggunakan penggalian *full face* sudah sesuai dengan aturan. Untuk *displacement* pada terowongan merujuk kepada *japan society civil engineer* (JSCE) tentang mbang batas *displacement* yang

diperbolehkan adalah 10 cm. maka dari itu nilai *displacement* pada penggalian *full face* sudah sesuai dengan aturan menurut JSCE.

4.4 Rancangan terowongan berdasarkan kondisi aktual dilapangan

Penggalian terowongan 11 sesuai dengan kondisi actual dilapangan menggunakan metoa top heading and benching, dimana penggalian terbagi menjadi 3 stage penggalian yaitu top heading, middle dan lower. Penyangga yang digunakan pada terowongan 11 adalah shotcrete K-400 #10 mm

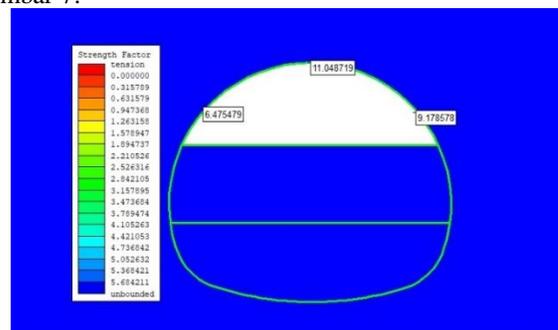
4.2.1. Analisis kestabilan terowongan pada penggalian top heading tanpa penyangga

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan menggunakan metode elemen hingga pada *top heading* tanpa penyangga didapatkan nilai *strength factor* seperti tabel 8.

Tabel 8. Nilai strength faktor pada penggalian *top heading* tanpa penyangga.

| Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|---------------|----------|----------|----------------------|
| Atap | 1,431487 | 0,143966 | 11,048719 |
| Dinding Kanan | 2,410018 | 0,300982 | 6,475479 |
| Dinding Kiri | 1,785046 | 0,255277 | 9,178578 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 7.



Gambar 7. Nilai *Strenght Factor* Penggalian *Top Heading* Tanpa Penyangga

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada *top heading* tanpa penyangga. didapatkan nilai *displacement* pada tabel 9.

Tabel 9. Nilai horizontal displacement dan vertical displacement pada penggalian top heading tanpa peyangga.

| Bagian | Total displacement (m) |
|---------------|------------------------|
| Atap | 0,002484 |
| Dinding Kanan | 0,015260 |
| Dinding Kiri | 0,015551 |

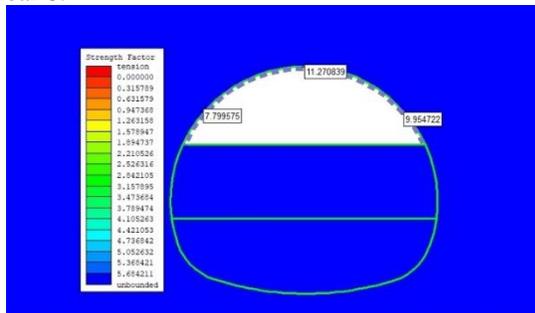
4.2.2. Analisis kestabilan terowongan pada penggalian top heading dengan penyangga shotcrete K 400 #10 mm

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada penggalian top heading dengan menggunakan penyangga didapatkan nilai *strength factor* seperti tabel 10.

Tabel 10. Nilai *strength factor* pada penggalian top heading dengan menggunakan penyangga

| Bagian | c | φ | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|---------------|-----|----|----------|----------|----------------------|
| Atap | 9,2 | 37 | 1,431487 | 0,143966 | 11,270839 |
| Dinding Kanan | 9,2 | 37 | 2,410018 | 0,300982 | 7,799575 |
| Dinding Kiri | 9,2 | 37 | 1,785046 | 0,255277 | 9,954722 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 8.



Gambar 8. Nilai *Strength Factor* Penggalian Top Heading Dengan Penyangga

Berdasarkan analisis nilai *strength factor* pada penggalian top heading dengan menggunakan penyangga dan tanpa penyangga. Nilai *strength factor* mengalami kenaikan ketika diberikan penyangga. hal ini dapat membuat terowongan menjadi stabil .

Setelah dilakukan analisis nilai *strength factor* pada penggalian top heading, didapatkan nilai *displacement* seperti tabel 11.

Tabel 11. Nilai *horizontal displacement* dan *vertical displacement*

| Bagian | Total displacement (m) |
|---------------|------------------------|
| Atap | 0,002211 |
| Dinding Kanan | 0,015242 |
| Dinding Kiri | 0,015611 |

Nilai *displacement* pada penggalian top heading dengan menggunakan penyangga dan tanpa penyangga. nilai *displacement* mengalami penurunan sesudah diberikan penyangga. sedangkan pada dinding kiri mengalami kenaikan sebesar 0,006 cm.

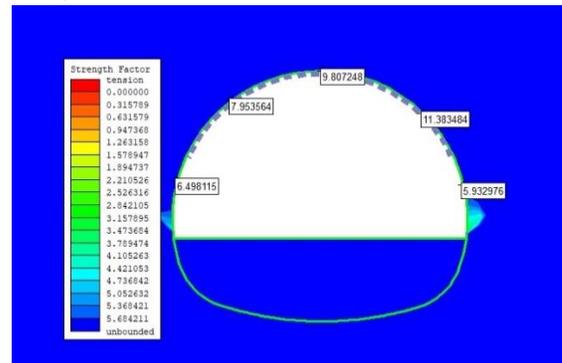
4.2.3. Analisis kestabilan terowongan pada middle tanpa penyangga.

Setelah dilakukan penggalian dan penyanggaan pada top heading, dilanjutkan penggalian pada middle. Dari analisis kestabilan terowongan pada penggalian middle didapatkan nilai *strength factor* pada tabel 12.

Tabel 12. Nilai *strength factor* pada penggalian middle tanpa penyangga

| Stage penggalian | Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|------------------|---------------|----------|----------|----------------------|
| Top Heading | Atap | 1,766786 | 0,206177 | 9,807248 |
| | Dinding Kanan | 2,379743 | 0,266207 | 7,740688 |
| | Dinding Kiri | 1,497219 | 0,204424 | 11,243033 |
| Middle | Dinding Kanan | 3,285500 | 0,273160 | 5,743036 |
| | Dinding Kiri | 3,446275 | 0,318795 | 5,557881 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 9.



Gambar 9. Nilai *Strength Factor* Penggalian Middle Tanpa Penyangga

Setelah dilakukan penggalian pada middle nilai *strength factor* pada terowongan mengalami penurunan. Hal ini disebabkan penggalian terowongan yang semakin lebar. Sehingga tegangan yang pada sekitar terowongan semakin besar. Semakin besar tegangan yang muncul dapat membuat faktor keamanan mengalami penurunan.

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada penggalian middle tanpa penyangga didapatkan nilai *displacement* pada tabel 13.

Tabel 13. Nilai *horizontal displacement* dan *vertical displacement*. Pada penggalian middle tanpa penyangga.

| Stage Penggalian | Bagian | Total displacement (m) |
|------------------|---------------|------------------------|
| Top Heading | Atap | 0,002457 |
| | Dinding Kanan | 0,014812 |
| | Dinding Kiri | 0,016525 |
| Middle | Dinding Kanan | 0,014107 |
| | Dinding Kiri | 0,015632 |

Setelah dilakukan penggalian pada *middle* didapatkan nilai *displacement* sekitar lubang bukaan. Nilai *displacement* mengalami kenaikan pada atap sebesar 0,025 cm dan pada bagian dinding kiri *top heading* sebesar 0,091 cm. hal ini dikarenakan penggalian pada terowongan yang semakin lebar sehingga gaya penahan pada batuan mengalami penurunan. Sehingga terjadi perpindahan/deformasi.

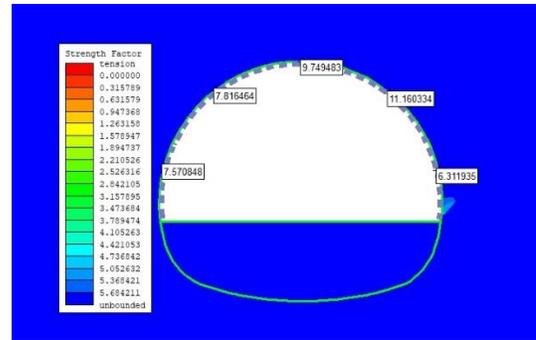
4.2.4. Analisis kestabilan terowongan pada penggalian middle dengan menggunakan penyangga shotcrete K-400 #10 mm

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan dengan menggunakan penyangga, didapatkan nilai strength factor pada tabel 14

Tabel 14. Nilai *strength factor* pada penggalian middle dengan menggunakan penyangga

| Stage penggalian | Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|------------------|---------------|----------|----------|----------------------|
| Top Heading | Atap | 1,785506 | 0,211367 | 9,749483 |
| | Dinding Kanan | 2,493058 | 0,303792 | 7,564361 |
| | Dinding Kiri | 1,583715 | 0,233895 | 10,941567 |
| Middle | Dinding Kanan | 2,871270 | 0,363715 | 6,777996 |
| | Dinding Kiri | 3,138177 | 0,318573 | 6,053125 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 10.



Gambar 10. Nilai *Strength Factor* Penggalian Middle Dengan Penyangga

Setelah dilakukan penyangga pada *middle*. Nilai strength factor pada dinding kiri dan kanan middle mengalami kenaikan setelah diberikan penyangga. sedangkan pada atap, dinding kanan dan kiri *top heading* mengalami penurunan.

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada *middle* dengan menggunakan penyangga. didapatkan nilai *displacement* pada tabel 15.

Tabel 15. *Horizontal displacement* dan *vertical displacement* pada penggalian middle dengan menggunakan penyangga.

| Stage Penggalian | Bagian | Total displacement (m) |
|------------------|---------------|------------------------|
| Top Heading | Atap | 0,002294 |
| | Dinding Kanan | 0,014772 |
| | Dinding Kiri | 0,016541 |
| Middle | Dinding Kanan | 0,014073 |
| | Dinding Kiri | 0,015678 |

Setelah dilakukan penyangga pada penggalian *middle*. Nilai *horizontal displacement* mengalami kenaikan pada dinding kiri *top heading* sebesar 0,0016 cm dan dinding kiri pada *middle* sebesar 0,0046 cm.

4.2.5. Analisis kestabilan terowongan pada penggalian lower tanpa penyangga

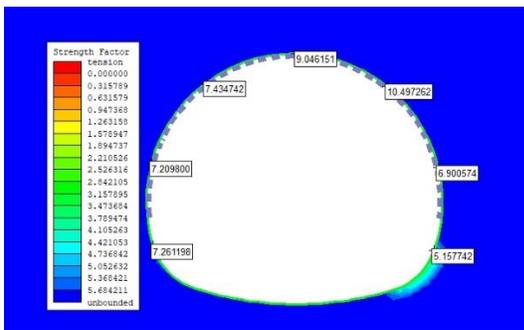
Setelah dilakukan penggalian dan perkuatan pada middle, dilanjutkan penggalian pada lower. Setelah dilakukan analisis pada penggalian lower didapatkan nilai *strength factor* pada tabel 16.

Tabel 16. Nilai *strength factor* pada penggalian lower tanpa penyangga

| Stage Penggalian | Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|------------------|---------------|----------|----------|----------------------|
| Top Heading | Atap | 1,993373 | 0,250797 | 9,046151 |
| | Dinding Kanan | 2,647447 | 0,329353 | 7,241288 |
| | Dinding Kiri | 1,655921 | 0,245142 | 10,593426 |

| Stage Penggalian | Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|------------------|---------------|----------|----------|----------------------|
| Middle | Dinding Kanan | 2,664316 | 0,202789 | 6,717305 |
| | Dinding Kiri | 2,531141 | 0,176664 | 6,867840 |
| Lower | Dinding Kanan | 3,049188 | 0,245412 | 6,038033 |
| | Dinding Kiri | 3,956081 | 0,468631 | 5,157742 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 11.



Gambar 11. Nilai *Strenght Factor* Penggalian Lower Tanpa Penyangga

Setelah dilakukan penggalian pada *lower*. Nilai *strength factor* mengalami penurunan. Penurunan terjadi pada atap, dinding kanan dan kiri top heading. Penurunan nilai *strength factor* disebabkan penggalian terowongan yang semakin lebar. Hal ini menyebabkan munculnya tegangan yang besar pada sekitar terowongan.

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada penggalian lower tanpa penyangga. didapatkan nilai *displacement* sekitar lubang bukaan seperti tabel 17.

Tabel 17. Nilai *horizontal displacement* dan *vertical displacement* pada penggalian lower tanpa penyangga

| Stage Penggalian | Bagian | Total displacement (m) |
|------------------|---------------|------------------------|
| Top Heading | Atap | 0,002103 |
| | Dinding Kanan | 0,014521 |
| | Dinding Kiri | 0,016980 |
| Middle | Dinding Kanan | 0,013381 |
| | Dinding Kiri | 0,016683 |
| Lower | Dinding Kanan | 0,012928 |
| | Dinding Kiri | 0,015625 |

Setelah dilakukan penggalian pada *lower* tanpa penyangga. nilai *horizontal displacement* mengalami kenaikan pada

dinding kiri *top heading* sebesar 0,044 cm dan dinding kiri *middle* sebesar 0,101 cm.

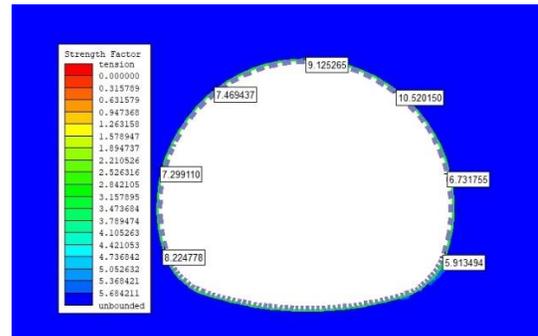
4.2.6. Analisis kestabilan terowongan pada penggalian lower dengan menggunakan penyangga

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada *lower* dengan menggunakan penyangga. didapatkan nilai *strength factor* pada tabel 18.

Tabel 18. Nilai *strength factor* pada penggalian lower dengan menggunakan penyangga

| Stage Penggalian | Bagian | Sigma 1 | Sigma 3 | Faktor Keamanan (FK) |
|------------------|---------------|----------|----------|----------------------|
| Top Heading | Atap | 1,969355 | 0,246832 | 9,125265 |
| | Dinding Kanan | 2,638164 | 0,328986 | 7,264190 |
| | Dinding Kiri | 1,669588 | 0,250982 | 10,560185 |
| Middle | Dinding Kanan | 2,722837 | 0,251008 | 6,743353 |
| | Dinding Kiri | 2,690036 | 0,224624 | 6,664827 |
| Lower | Dinding Kanan | 2,289613 | 0,396141 | 7,289649 |
| | Dinding Kiri | 3,643547 | 0,614886 | 5,913494 |

Setelah dilakukan perhitungan faktor keamanan secara analitik didapatkan nilai faktor keamanan mendekati nilai *strength factor* yang didapatkan secara numerik. seperti gambar 12.



Gambar 12. Nilai *Strenght Factor* Penggalian Lower Tanpa Penyangga

Setelah dilakukan penyanggaan pada *lower*. Nilai *strength factor* pada dinding kanan dan kiri *lower* mengalami kenaikan setelah diberikan penyangga. pemberian penyangga pada terowongan dapat membuat terowongan lebih stabil.

Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan pada penggalian lower dengan penyangga, didapatkan nilai *displacement* sekitar lubang bukaan seperti table 19.

Table 19. Nilai *horizontal displacement* dan *vertical displacement* pada penggalian lower dengan penyangga

| Stage Penggalian | Bagian | Total displacement (m) |
|------------------|---------------|------------------------|
| Top Heading | Atap | 0,002061 |
| | Dinding Kanan | 0,014541 |
| | Dinding Kiri | 0,016915 |
| Middle | Dinding Kanan | 0,013451 |
| | Dinding Kiri | 0,016547 |
| Lower | Dinding Kanan | 0,013031 |
| | Dinding Kiri | 0,015422 |

Setelah dilakukan penggalian pada *lower* dengan penyangga. Nilai *horizontal displacement* mengalami kenaikan pada dinding kanan *top heading* sebesar 0,002 cm, dinding kanan *middle* sebesar 0,007 cm dan dinding kanan *lower* sebesar 0,0103 cm.

Berdasarkan KEPMEN 1827K/MEM/30/2018 untuk ambang batas factor keamanan yang diperbolehkan pada terowongan *fix facility* adalah 2.0. Sedangkan pada terowongan 11 nilai factor keamanan paling rendah adalah 5 maka dari itu nilai factor keamanan pada penggalian *top heading and benching* sudah sesuai dengan kriteria aturan dalam konstruksi terowongan. Untuk nilai *displacement*, sesuai dengan *japan society civil engineer* (JSCE) tentang ambang batas *displacement* yang diperbolehkan adalah 10 cm. maka dari itu nilai *displacement* pada terowongan 11 sudah sesuai dengan aturan

5. Penutup

5.1. Kesimpulan

1. Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan berdasarkan rekomendasi dari Bieniawski 1989 menggunakan nilai RMR. Metoda penggalian menggunakan metoda *full face* dengan penyangga shotcrete K-400 #10 mm. Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan dengan metoda elemen hingga. Nilai *strength factor* paling rendah yaitu 6,3 dan nilai *displacement* paling besar yaitu 1,69 cm pada dinding kiri tanpa penyangga. Nilai faktor keamanan yang didapatkan sudah sesuai dengan KEPMEN 1827K/MEM/30/2018 dan *displacement* yang didapatkan sudah sesuai dengan *Japan Society Civil Engineers* (JSCE).
2. Berdasarkan kondisi aktual dilapangan penggalian pada terowongan 11 menggunakan metoda *top heading and bench*. Setelah dilakukan analisis kestabilan terowongan menggunakan metoda elemen hingga. Nilai *strength factor* paling kecil yaitu 5,2 dan nilai *displacement* paling besar yaitu 1,7 cm pada dinding kiri lower tanpa penyangga. Nilai faktor keamanan yang didapatkan sudah sesuai dengan KEPMEN 1827K/MEM/30/2018 dan nilai *displacement* yang didapatkan sudah sesuai dengan *Japan Society Civil Engineers* (JSCE).

3. Berdasarkan simulasi permodelan pada terowongan 11 dengan menggunakan tipe *shotcrete* yang berbeda. Didapatkan penyangga yang optimal pada terowongan 11 yaitu dengan menggunakan *shotcrete* K-175 #10 mm dan penggalian menggunakan metoda *top heading and bench*

a. Saran

1. Dalam melakukan analisis secara numerik permodelan dibuat menggunakan autocad dalam bentuk DXF
2. Pastikan permodelan yang di import ke dalam phase 2 sudah benar sesuai settingan sebelum diimport.
3. Dalam memasukan properties material, pastikan data yang didapat sudah sesuai dan lengkap
4. Jika memasukan penyanggaan pada terowongan di phase2 dengan menggunakan stage penggalian, maka install support dilakukan secara bertahap
5. Permodelan pada phase 2 dalam bentuk 2D memiliki kekurangan seperti tidak bisanya memasukan faktor kemajuan saat penggalian. Sebaiknya untuk selanjutnya penulis menyarankan analisis numerik dengan menggunakan permodelan 3D

Daftar Pustaka :

- [1]. Annisaul Hidayah. 2019. Analisis Pengaruh Penggunaan *Rockbolt* Pada Terowongan Notog Bh 1440. Menggunakan Software phase2. Jurnal Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang.
- [2]. Arwan Apriyono dan Sumiyanto. 2010. Tinjauan Kekuatan Sistem Penyangga Terowongan dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. Jurnal Rekayasa Dinamika Prodi UNSOED.
- [3]. Bieniawski, Z.T., 1976. *Rock Mass Clasifications in Rock Engineering.*, Proceeding Symposium on Exploration for Rock Engineering, Ed. Z.T. Bieniawski, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 97-106.
- [4]. Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Clasifications.*, John Wiley & Sons, New York, p. 251.
- [5]. Bieniawski, Z.T., 1984, *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling.*, The Pennsylvania State University, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 272.
- [6]. Das, Ratan. 2017. "Numerical analysis of surface subsidence in asymmetric parallel highway tunnels". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 9 (2017) 170-179.
- [7]. Desmawita, I., Kopa, R., & Gusman, M. (2018). Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Berdasarkan

Klasifikasi Geomekanika Pada Tambang Bawah Tanah CV. Tahiti Coal, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. *Bina Tambang*, 3(1), 365-37

- [8]. Dias Dwi Hatmoko, Dan Hanindya Kusuma Artati. 2018. Analisis Stabilitas Terowongan Dengan Perkuatan Wiremesh Dan Rockbolt Menggunakan Metode Elemen Hingga, *Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia*.
- [9]. Dody Hermawan¹, Indra Noer Hamdhan. 2019. Analisis Geoteknik Terowongan Kereta Api Kebasen Menggunakan Metode Elemen Hingga 3d. Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung. Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional. Bandung.
- [10]. Fadhillah, Ryan ahmad. 2016. " Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga". Jurusan Teknik Sipil Itenas (Vol. 2 No. 4 Desember 2016)
- [11]. Firaz, Muh. Fathin, dkk. 2013. "Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Tambang Bawah Tanah Menggunakan Metode Elemen Hingga". *Jurnal Teknik Pertambangan UPN, Yogyakarta* (Tahun 2013).
- [12]. Koppa. Raimon. 1990. *Bahan Ajar Studi Teknik Terowongan*. Padang: FT UNP.
- [13]. Prengki, I., & Heriyadi, B. (2018). Analisis Beban Runtuh Dan Evaluasi Lubang Bukaan Berdasarkan Metode Rock Mass Rating Dan Q-System Pada Tambang Bawah Tanah CV. Bara Mitra Kencana, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. *Bina Tambang*, 3(4), 1729- 1739.
- [14]. Kresna Wattimena, Ridho. 2017. *Mekanika Batuan dan Perencanaan Konstruksi Bawah Tanah*. ITB. Bandung.
- [15]. Wilham George Louhenapessy . 2020. *Disain Terowongan Di Batuan: Perbandingan Metode Klasifikasi Batuan Dan Metode Elemen Hingga Kriteria Runtuh Getas- Daktail Batuan Berkekar*. *Jurnal Cintech. jurusan Teknik Sipil, Calvin Institute Of Technology*