

ANALISIS GEOTEKNIK TEROWONGAN KERETA API KEBASEN MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA 3D

Dody Hermawan¹, Indra Noer Hamdhan²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung

Email: heemawandody@gmail.com

ABSTRACT

Kebasen Hills, Banyumas has plans to build a railway track that has a double track configuration to fulfill the increasing number of users. In very limited areas of construction tunnel is an option to use as the construction solution. Geotechnical analysis of the Kebasen railway tunnel is required to estimate the safety factor, face stability, and internal forces in the tunnel. The tunnel reinforcement system used in mixed-face formations of Kebasen Hills is rock bolts and shotcrete using New Austrian Tunneling Method (NATM) construction methods. The models used is a reinforced model and non-reinforced model, and analyzed with finite element method – 3D. Result of safety factor for reinforced model is 8.35 with 0,0737 m deformation, and safety factor for non-reinforced model is 1.84 with 0,417 m deformation.

Key word: tunnel, face stability, finite element method, NATM, hoek-brown, rock bolt, shotcrete, deformasi.

ABSTRAK

Perbukitan Kebasen, Banyumas memiliki rencana membangun jalur rel kereta yang mempunyai konfigurasi double track guna memenuhi peningkatan jumlah pengguna. Pada wilayah yang sangat terbatas daerah jangkauan konstruksinya terowongan merupakan salah satu pilihan yang dapat digunakan. Analisis geoteknik terowongan kereta api Kebasen dibutuhkan untuk mengetahui nilai faktor keamanan, face stability, dan gaya-gaya dalam yang bekerja pada terowongan tersebut. Sistem perkuatan terowongan yang digunakan pada formasi tanah-batuan di perbukitan Kebasen adalah rock bolt dan shotcrete dengan menggunakan metode konstruksi New Austrian Tunneling Method (NATM). Model yang digunakan adalah model dengan perkuatan dan tanpa perkuatan, dan dianalisis dengan metode elemen hingga 3-dimensi. Hasil yang diperoleh pada model dengan perkuatan, yaitu nilai faktor keamanan 8,35 dengan deformasi terbesar 0,0737 m, sedangkan pada model tanpa perkuatan nilai faktor keamanan adalah 1,84 dengan deformasi sebesar 0,417 m.

Kata Kunci: terowongan, face stability, metode elemen hingga, NATM, rock bolt shotcrete, deformasi

1 PENDAHULUAN

Pada situasi medan yang sangat terbatas wilayah konstruksinya dan tidak memungkinkan untuk mendapatkan solusi infrastruktur yang memadai pada masalah yang kompleks, terowongan menjadi salah satu pilihan yang optimal dalam dunia perencanaan rancang bangun. Terowongan dirancang karena ada kebutuhan akan pergerakan orang atau material dimana tidak ada cara lain yang praktis atau memadai untuk mencapai gerakan yang dibutuhkan secara lebih langsung, cepat, dan efisien.

Terowongan kereta api pada batuan keras yang akan dibangun membelah bukit berlokasi di daerah Kebasen, Jawa Tengah yang akan menghubungkan

jalur kereta api lintas Purwokerto – Purworejo. Terowongan kereta api Kebasen memiliki panjang 291 m dan lebar terowongan 10,4 m yang memiliki konfigurasi lajur ganda (*Double Track Railway*). Penelitian ini menganalisis stabilitas muka (*face stability*), deformasi, faktor keamanan dan pengaruh gaya dalam pada terowongan kereta api Kebasen dengan menerapkan beberapa kondisi yang berbeda dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) yang dimodelkan secara 3D menggunakan software PLAXIS 3D 2017. Peta lokasi konstruksi terowongan Kebasen dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Konstruksi Terowongan
(Sumber : <https://earth.google.com>)

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Terowongan

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya, dan mempunyai gradien memanjang kurang dari 15%. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkungan luar. Beberapa ahli teknik sipil mendefinisikan terowongan sebagai sebuah tembusan di bawah permukaan yang memiliki panjang minimal 0,1 mil atau 0,161 km, jika lebih pendek dari 0,1 mil disebut *underpass*.

2.2 Klasifikasi Terowongan

2.2.1 Berdasarkan kondisi lapangan

Berdasarkan material yang dihadapi, Raharjo (2004) menjelaskan terdapat 3 jenis terowongan, yaitu: Terowongan batuan (*Rock Tunnel*), Terowongan melalui tanah lunak (*Soft Ground Tunnel*), dan Terowongan gali-timbun (*Cut and Cover Tunnel*).

2.2.2 Berdasarkan kegunaan

Ditinjau berdasarkan kegunaan terowongan, Rai (1988) membagi terowongan menjadi 2 bagian, yaitu:

1. Terowongan lalu-lintas (*Traffic Tunnel*) diantaranya, yaitu: terowongan jalan raya, terowongan pejalan kaki, terowongan navigasi, dan terowongan transportasi tambang bawah tanah.
2. Terowongan angkutan, di antaranya yaitu: terowongan stasiun pembangkit listrik air, terowongan penyediaan air, terowongan saluran air kotor, dan terowongan yang digunakan untuk kepentingan umum.

2.2.3 Berdasarkan lokasi

Berdasarkan lokasinya terowongan dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu: terowongan bawah laut (*underwater tunnel*), terowongan pegunungan (*mountain tunnel*), dan terowongan dangkal perkotaan.

2.2.4 Berdasarkan jenis penggalian

Terowongan dibagi menjadi beberapa bagian berdasarkan jenis penggaliannya, yaitu:

1. *Full-face method*
Dalam metode ini, terowongan digali seluruh diameternya pada saat bersamaan. Ini sangat cocok untuk terowongan yang melewati tanah yang kuat.
2. *Top heading and bench method*
Terowongan digali menjadi beberapa bagian, dengan bagian *heading* digali terlebih dahulu dan setelah menempuh jarak tertentu, bagian bawah atau *bench* digali.
3. *Drift method*
Dalam metode ini setelah mengemudikan arus, lubang bor dibor sepanjang *drift* di seluruh bagian penampang terowongan, penuh dengan bahan peledak dan dinyalakan.

2.3 Klasifikasi Massa Batuan

Massa batuan memiliki pergerakan yang terjadi pada bidang diskontinuitas pada massa batuan itu sendiri. Yang sangat membedakan tanah dengan batuan adalah diskontinuitas, hal ini akan sangat memengaruhi sifat massa batuan tersebut. Batuan utuh dan massa batuan memiliki perbedaan yang besar dalam parameter yang dihasilkan, dimana batuan utuh (*instact rock*) tidak memiliki bidang diskontinuitas, lain halnya dengan massa batuan (*rock mass*) yang memiliki bidang diskontinuitas.

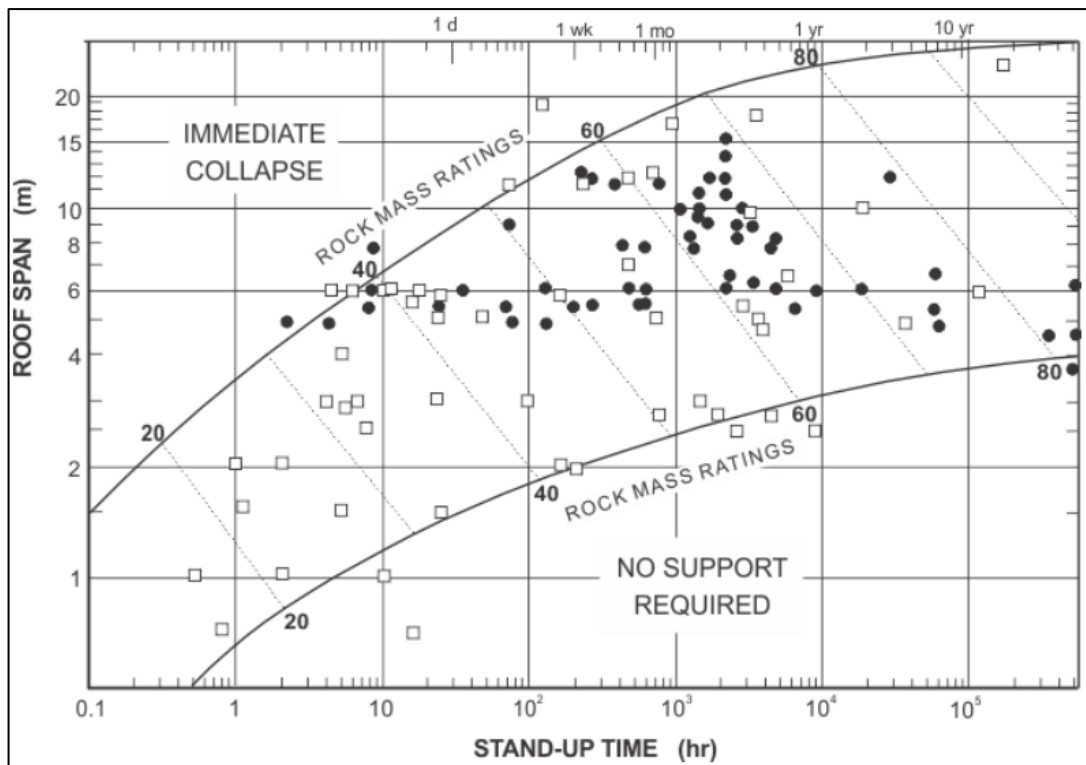
2.3.1 Rock Mass Rating (RMR)

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

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

1. *Uniaxial Compressive Strength* (UCS).
2. *Rock Quality Designation* (RQD).
3. Kondisi kekar (*Condition of discontinuities*).

4. Kondisi air tanah (*Groundwater conditions*).
 5. Jaran antar kekas (*Spacing of discontinuities*).
 6. Orientasi kekas (*Orientation of discontinuities*).
- Nilai RMR dapat dikorelasikan untuk menentukan *stand-up time* yang tersedia pada jenis batuan yang digunakan. *Stand-up time* adalah lamanya bidang yang digali dapat berdiri dengan aman tanpa adanya perkuatan. Metode yang digunakan adalah menggunakan kurva klasifikasi massa batuan (Bieniawski, 1989) dengan aspek teknik yang digunakan yaitu: *Rock Mass Rating*, Panjang Galian, *Stand-Up Time*. Kurva klasifikasi massa batuan dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Kurva Klasifikasi Massa Batuan
(Sumber: Bienawski, 1989)

2.3.2 Geological Strength Index (GSI)

Indeks kekuatan geologi (GSI) menghasilkan uji mutu massa batuan untuk perkiraan langsung kekuatan dan kekakuan batuan utuh dan rekahan. Kekuatan seluruh kumpulan patahan dan blok batuan besar dapat diperkirakan dengan uji geser langsung di lapangan, perhitungan balik longsoran batuan dan lereng runtuh, atau secara alternatif diperkirakan berdasarkan skema klasifikasi massa batuan (Hoek, 1995).

Dalam metode ini, tegangan utama maksimum (σ'_1) sesuai dengan tegangan utama minimum (σ'_3) pada keadaan runtuh melalui rumus empiris yang bergantung pada faktor-faktor:

1. Kuat tekan uniaksial batuan (σ_u),
2. Konstanta material jenis batuan (m_i),

3. Tiga buah parameter empiris yang menggambarkan tingkat patahan massa batuan (m_b , s , dan a).

2.4 Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown

Kriteria kegagalan Hoek-Brown adalah pendekatan non-linier yang lebih baik dari kekuatan batuan. Kriteria ini melibatkan kekuatan geser dan juga kekuatan tarik dalam formulasi kontinyu. bersama dengan hukum Hooke tentang perilaku elastis linear isotropik, Kriteria Hoek-Brown membentuk model perilaku batuan yang telah digeneralisasi dan telah diimplementasikan pada PLAXIS 3D 2017 Edisi 2002 untuk merangsang perilaku isotropik bahan tipe batuan.

Berikut adalah persamaan yang digunakan pada Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown, diperlihatkan pada **Persamaan 1**, dan **Persamaan 2**

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{-\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \dots (1)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad \dots (2)$$

Dengan:

σ'_1 = tekanan efektif major pada saat runtuh

σ'_3 = tekanan efektif minor pada saat runtuh

σ_{ci} = kuat tekan uniaxial kompresif pada material batuan utuh

m_b = parameter batuan padu (m_i) yang direduksi

m_i = parameter batuan padu (m_i)

GSI = *Geological Strength Index*

D = *Disturbance Factor*

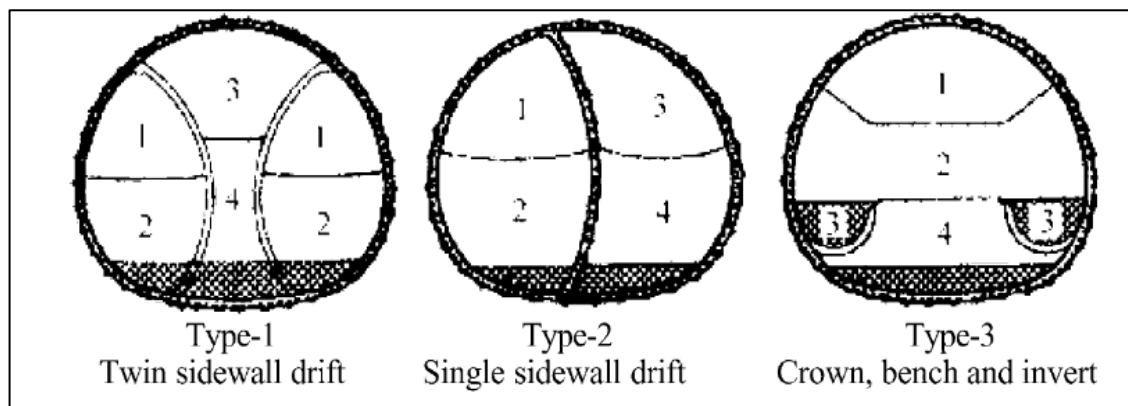
Dengan s dan a adalah material pembantu untuk massa batuan yang rumuskan pada **Persamaan 3** dan **Persamaan 4**.

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad \dots (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right] \quad \dots (4)$$

2.5 New Austrian Tunneling Method (NATM)

Menurut Rabcewicz (1964) NATM adalah metode konstruksi terowongan baru yang secara khusus disesuaikan untuk tanah yang tidak stabil telah dikembangkan yang menggunakan stabilisasi permukaan oleh lapisan shotcrete tipis, sesuai dengan penguatan batuan dan ditutup sesegera mungkin oleh invert. Pengukuran deformasi dan tekanan sistematis memungkinkan ketebalan lapisan yang dibutuhkan untuk dievaluasi dan dikendalikan. Ilustrasi penggalian NATM dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Macam-Macam Galian NATM
(Sumber : Bowers, 1997)

3 ANALISIS DATA

3.1 Data Terowongan

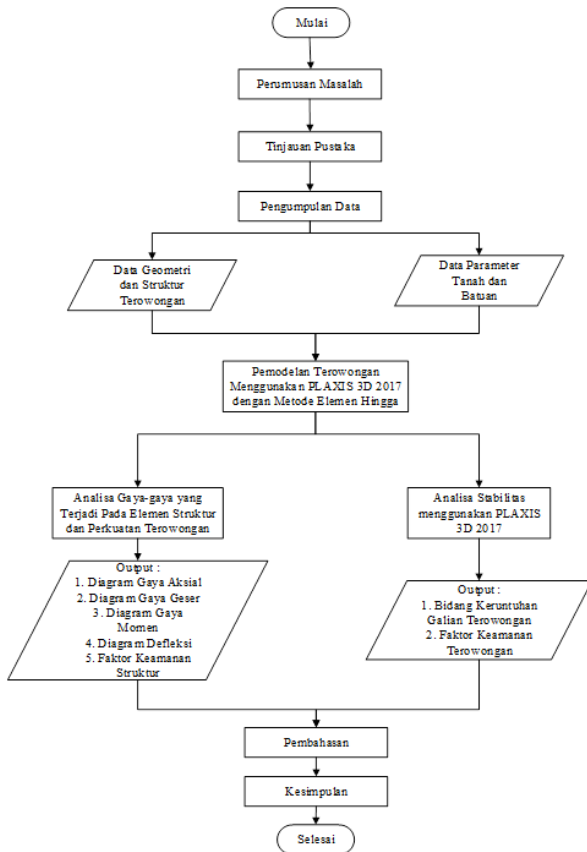
Data yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan serangkaian hasil penyelidikan geoteknik lapangan dan laboratorium, meliputi data parameter tanah dan batuan yang telah dilakukan oleh PT. Tridaya Sakti Mandiri yang disiapkan pada lokasi pembangunan terowongan kereta api Kebasen. Berikut data-data teknis yang didapat untuk pemodelan terowongan.

1. Jenis Batuan: Breksi Vulkanis, Lava Andesit
2. Jenis Tanah: Lempung kelanauan
3. Parameter Tanah: γ_{unsat} , γ_{sat} , c , ϕ , E , ν
4. Parameter Batuan: γ_{unsat} , GSI , ν , D , m_i , σ_{ci} , E
5. Parameter Shotcrete: d , γ , E , ν
6. Parameter Rock Bolt: γ , E , ϕ , Pile Type
7. Parameter Forepoling: γ , E , ϕ , Pile Type

Secara geologi, daerah konstruksi terowongan Kebasen masuk ke Lembar Banyumas, termasuk ke dalam Breksi anggota Formasi Halang, tersusun oleh batuan breksi dengan fragmen andesit, basalt dan batu gamping, masa dasar batu pasir tufan kasar dengan sisipan batu pasir dan lava basalt. Umur satuan ini terbentuk pada Miosen Akhir, mempunyai hubungan tidak selaras dengan Formasi Halang.

3.2 Bagan Alir Metodologi Analisis

Metodologi analisis pada dasar studi ini dijabarkan dalam bentuk diagram alir (*flow chart*) pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan Alir Penelitian

Diawali dengan perumusan masalah, studi pustaka, pengumpulan data dimana didapat dari hasil *Geotechnical Interpretative Report* milik PT. Adhi Karya yang berupa data uji lab dan investigasi lapangan, lalu menganalisis stabilitas muka (*face stability*), pengaruh gaya dalam yang terjadi pada terowongan, *stand up time* yang tersedia pada proses penggalian, dan beban-beban yang diperhitungkan pada Terowongan Kebasen. Terakhir dilakukan pembahasan dan pengambilan kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan.

4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Pemodelan

4.1.1 Parameter tanah

Pemodelan menggunakan 2 buah material model yaitu: Hoek-Brown Model untuk batuan, dan Mohr-Coulomb Model untuk tanah. Pemodelan yang dilakukan memperhitungkan parameter yang ada pada lapangan, sehingga membutuhkan parameter-parameter yang menunjang kondisi sesungguhnya. Data parameter tanah dan batuan diperoleh dari sampel yang telah diambil dari tempat konstruksi dan telah diuji laboratorium terlebih dahulu. **Tabel 1** menunjukkan parameter batuan di bukit Kebasen, dan **Tabel 2** menunjukkan parameter tanah bukit Kebasen.

Tabel 1. Parameter Batuan Terowongan Kebasen

| Jenis Batuan | γ_{Unsat} (kN/m ³) | E_{rm} (kN/m ²) | GSI | $ \sigma_{ci} $ (kN/m ³) | D | ν' | m_i |
|-----------------|--|----------------------------------|-----|---|---|--------|-------|
| Breksi Vulkanik | 24,7 | 50900 | 58 | 160000 | 0 | 0,31 | 19 |
| Lava Andesit | 27,5 | 440000 | 75 | 70000 | 0 | 0,31 | 25 |

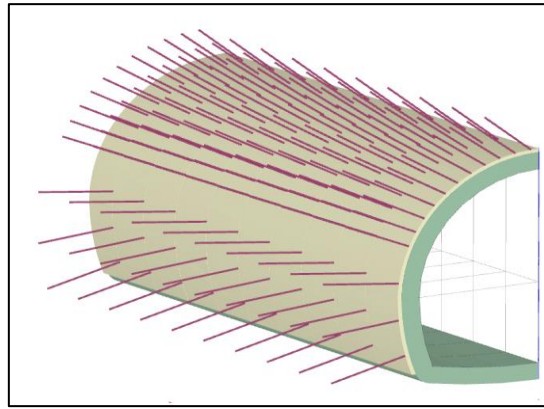
Tabel 2. Parameter Tanah Terowongan Kebasen

| Jenis Tanah | γ_{Unsat} (kN/m ³) | γ_{sat} (kN/m ³) | ν' | E' (kN/m ²) | C (kN/m ²) | ϕ (°) |
|-------------|--|--|--------|------------------------------|---------------------------|------------|
| Lanau | 16 | 19,5 | 0,31 | 18000 | 6 | 35 |

4.1.2 Pemodelan Geometri Terowongan

Dibuat 2 model dengan perbedaan dengan perkuatan dan tanpa perkuatan dengan panjang terowongan yang dimodelkan sepanjang 19,5 m sehingga profil geometri terowongan yang digunakan hanya profil pada bagian portal. Setelah dimasukkan parameter tanah, batuan, dan perkuatan

terowongan, maka selanjutnya memasuki tahap mendesain terowongan. Terowongan dimodelkan hanya setengah badan dari profil utuhnya guna mempermudah dan mempersingkat banyaknya data yang dimasukkan ke dalam proses analisis. Hasil model geometri terowongan Kebasen dengan panjang 19,5 m dapat dilihat pada **Gambar 5**

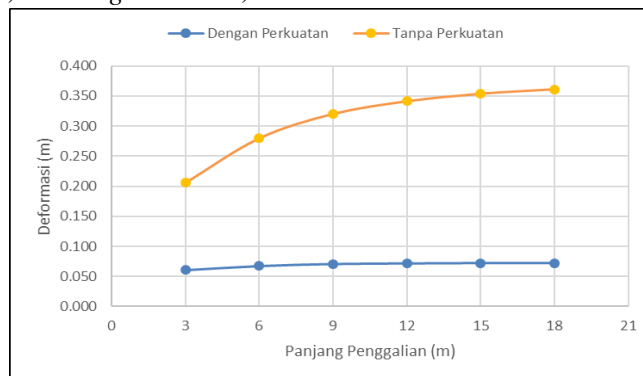


Gambar 5. Geometri Terowongan Kebasen (Sumber: Plaxis 3D 2017)

4.2 Hasil Analisis

Hasil analisis yang digunakan dari pemodelan terowongan Kebasen adalah *total displacement*, *axial force*, *shear force*, *bending moments*, dan

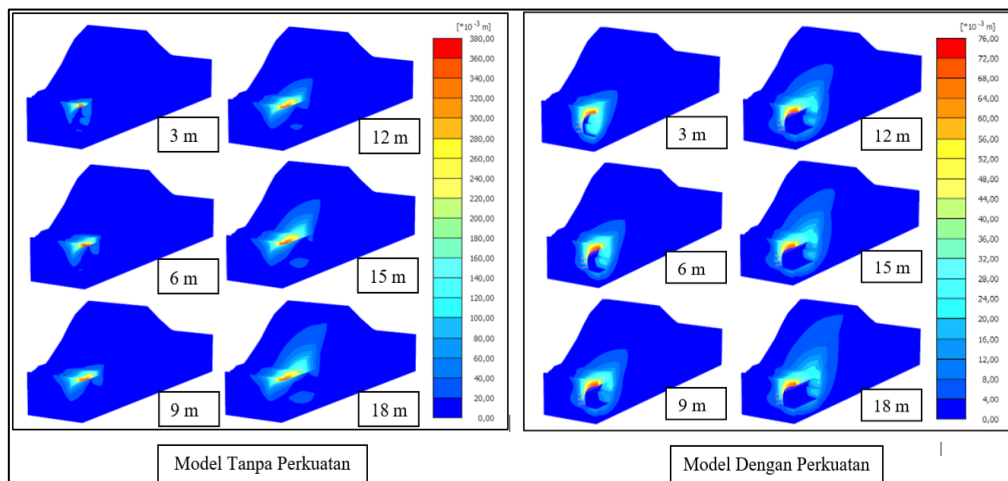
safety factor (SF). Nilai *displacement* dibandingkan antara model dengan perkuatan dan tanpa perkuatan. **Gambar 6** merupakan hasil analisis *displacement* Plaxis 3D 2017.



Gambar 6. Grafik perbandingan deformasi dengan panjang galian.

Dari **Gambar 6** terlihat bahwa model dengan perkuatan mengalami kenaikan nilai deformasi yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan model tanpa perkuatan. Model tanpa perkuatan memperoleh kenaikan nilai deformasi yang signifikan dimana nilai deformasi sebesar 0,417 m pada model tanpa perkuatan dan 0,0737 m pada

model dengan perkuatan. Pengaruh dari sistem perkuatan terowongan sangat signifikan dalam mempertahankan stabilitas dan mengurangi deformasi yang terjadi terlebih karena daerah portal terowongan Kebasen didominasi oleh tanah lanau. Hasil analisis Plaxis 3D 2017 pada tiap panjang penggalian dapat dilihat pada **Gambar 7**.



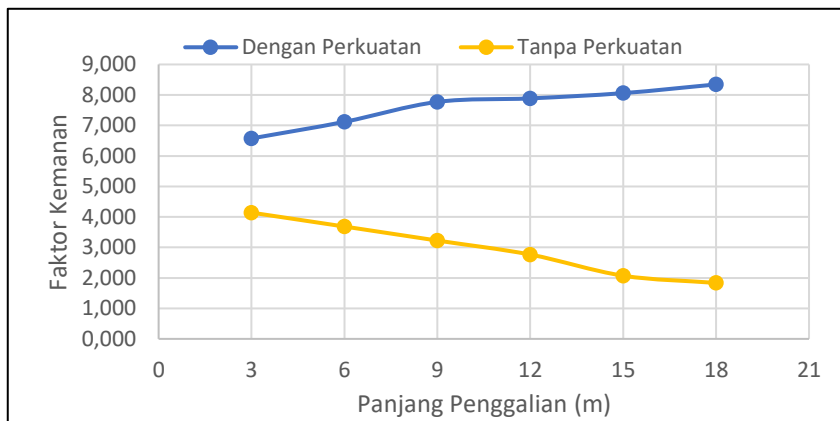
Gambar 7. Hasil total displacement pada analisis Plaxis 3D 2017 (Sumber : Plaxis 3D 2017)

Gaya dalam yang terjadi, yaitu: gaya geser, gaya aksial dan momen pada setiap panjang terowongan dengan perkuatan kemudian dianalisis Besar gaya-gaya dalam tersebut diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai gaya-gaya dalam pada pemodelan terowongan Kebasen

| Panjang Galian (m) | Shear Force | | Axial Force | | Moments | |
|--------------------|-------------|--------|-------------|--------|---------|--------|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| | (kN/m) | (kN/m) | (kN/m) | (kN/m) | (kN/m) | (kN/m) |
| 3 | -164,1 | 68,4 | -365,5 | 24,5 | -46,67 | 11,8 |
| 6 | -100,1 | 145,8 | -968,2 | 31,7 | -190,2 | 6,7 |
| 9 | -125,4 | 173,0 | -1002,0 | 67,6 | -264,3 | 7,9 |
| 12 | -161,1 | 174,1 | -1350,0 | 107,6 | -292,4 | 20,7 |
| 15 | -198,7 | 219,9 | -1723,0 | 108,4 | -300,2 | 24,3 |
| 18 | -208,2 | 288,5 | -1859,0 | 541,11 | -323,0 | 27,8 |
| 3 | -164,1 | 68,4 | -365,5 | 24,5 | -46,67 | 11,8 |

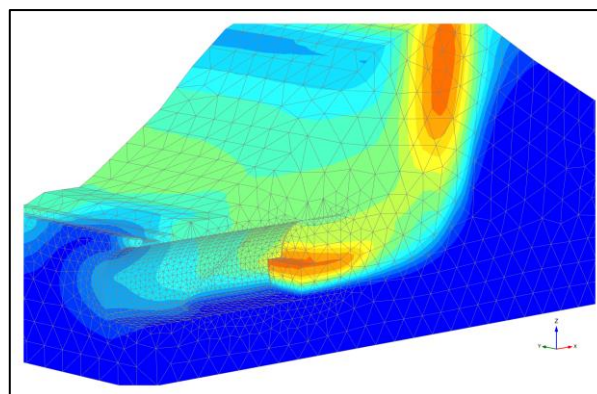
Dari analisis *shear force* yang telah dilakukan terlihat distribusi tegangan yang dominan pada awal penggalian. Besarnya gaya geser yang terjadi pada sistem perkuatan terowongan pada panjang penggalian 19,5 m sebesar 267,9 kN/m.



Gambar 8. Grafik perbandingan SF dengan panjang penggalian

Berdasarkan grafik pada **Gambar 8** terlihat bahwa pada model terowongan dengan perkuatan mendapatkan hasil nilai faktor keamanan meningkat seiring terpasangnya sistem perkuatan terowongan yang terintegrasi setiap panjang penggaliannya. nilai faktor keamanan akhir sebesar $8,35 > 2,5$. Sedangkan pada model tanpa perkuatan hasil nilai faktor keamanan menjadi semakin menurun. Pada akhirnya nilai faktor keamanan yang didapat pada model terowongan tanpa perkuatan adalah $1,84 < 2$, hasil ini menandakan bahwa penggalian yang

dilakukan pada daerah portal terowongan Kebasen harus membutuhkan *immediately support* untuk mempertahankan bentuk lubang yang digali. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem perkuatan yang digunakan pada terowongan Kebasen bekerja sangat signifikan dalam menjaga bentuk terowongan. Terakhir adalah bidang keruntuhan yang dapat terjadi pada proses konstruksi terowongan Kebasen yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Face stability pada terowongan Kebasen

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

1. Kondisi dan bentuk geometri dari daerah perbukitan Kebasen sangat berpengaruh terhadap kondisi dan pengerjaan terowongan.
2. Material campuran tanah-batuan yang ada pada daerah perbukitan Kebasen mengharuskan daerah portal menggunakan profil dengan tebal *lining* cukup besar dan penggunaan *slicing* 1,5 m pada awal pengerjaan terowongan (hingga daerah portal selesai).
3. Besarnya deformasi yang terjadi pada terowongan Kebasen pada model tanpa perkuatan dan model dengan perkuatan didapat nilai deformasi yang cukup jauh berbeda, maka sistem perkuatan yang digunakan sudah sesuai kebutuhan.
4. Sistem perkuatan yang digunakan pada terowongan Kebasen terbukti sangat meningkatkan tingkat keamanan saat penggalian dengan nilai SF yang meningkat sebesar 78% setelah sistem perkuatan pada penggalian terowongan terpasang.
5. Kondisi awal portal yang didominasi oleh material tanah lanau mengakibatkan *stand-up time* dan panjang galian efektif yang dihitung sebelumnya tidak dapat langsung digunakan karena akan terjadi penurunan seketika yang cukup signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad Fadhillah, Ryan. 2016. Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga. Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- Aldiamar, Fahmi. 2016. Pemodelan Numerik Penentuan Panjang Laju Penggalian untuk Terowongan Jalan. Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Bandung.
- Apriono, Arwan. 2010. Tinjauan Kekuatan Sistem Penyangga Terowongan dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto.
- Hoek, Evert. 2006. *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer Inc, Columbia.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2007. Standard Specifications for Tunneling-2006: Mountain Tunnels. Tokyo: JSCE.
- Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015. Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanah-Batuan. Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017. SNI Persyaratan Perancangan Geoteknik. Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- O'Bickel, John. 1996. *Tunnel Engineering Hand Book*. ISBN 978-1-4613-0449-4. Kluwer Academic, Massachusetts.
- Plaxis 2017. Tutorial Manual 2017. Plaxis BV, Netherland.
- Rai, Made Astawa. 1988. *Perencanaan dan Pelatihan Teknik Terowongan*. Laboratorium Geoteknik Pusat Antar Universitas Ilmu Rekayasa Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- U.S. Departement of Transportation Federal Highway Administration. 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*. National Highway Institute, Washington D.C.