

Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga

RYAN ACHMAD FADHILLAH, INDRA NOER HAMDHAN

Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung
e-mail: daderaf@gmail.com

ABSTRAK

Gunung Geurutee Aceh memiliki kondisi standar alinyemen vertikal maupun horizontal masih belum terpenuhi, begitu juga waktu tempuh efektif. Timbul wacana pembangunan terowongan di kawasan Gunung Geurutee Aceh. Analisis geoteknik terowongan batuan Geurutee dibutuhkan untuk mengetahui gaya dalam yang terjadi pada terowongn tersebut dengan adanya sistem perkuatan sementara, nilai faktor keaamanan (FK), dan face stability menggunakan metode elemen hingga. Metode konstruksi terowongan menggunakan metode New Austrian Tunneling Methode (NATM) dan Metode penggalian mengacu pada metode Japanese Society of Civil Engineers (JSCE). Model yang dibuat adalah terowongan dengan perkuatan sementara dengan tanpa perkuatan sementara, untuk membandingkan total displacement yang terjadi pada model tersebut dimana perkuatan sementara yaitu menggunakan rock bolt dan shotcrete. Kedua model tersebut menghasilkan nilai SF 7,076 untuk model dengan perkuatan sementara dan 4,525 untuk model tanpa perkuatan.

Kata kunci: terowongan batuan, analisi geoteknik, face stability, metode elemen hingga NATM, JSCE, rock bolt, shotcrete.

ABSTRACT

Mount Geurutee Aceh has a standard condition horizontal and vertical alignment that are still not fulfilled, as well as effective travel time. Arising discourse construction of tunnels in the area of Mount Geurutee Aceh. Geurutee rock tunnel geotechnical analysis is required to determine the force that occurs in the tunnel with temporary reinforcement system, the value of the safety factor (SF), and face stability using the finite element method. Tunnel construction method using the New Austrian Tunneling Method (NATM) and the excavation method refers to the method of Japanese Society of Civil Engineers (JSCE). The model created is temporary reinforcement system tunnels and without temporary reinforcement system, to compare the total displacement that occurred on that model where temporary reinforcement system while using rock bolt and shotcrete. Both models come SF value 7.076 for the model with temporary reinforcement system and 4,525 for the model without temporary reinforcement system.

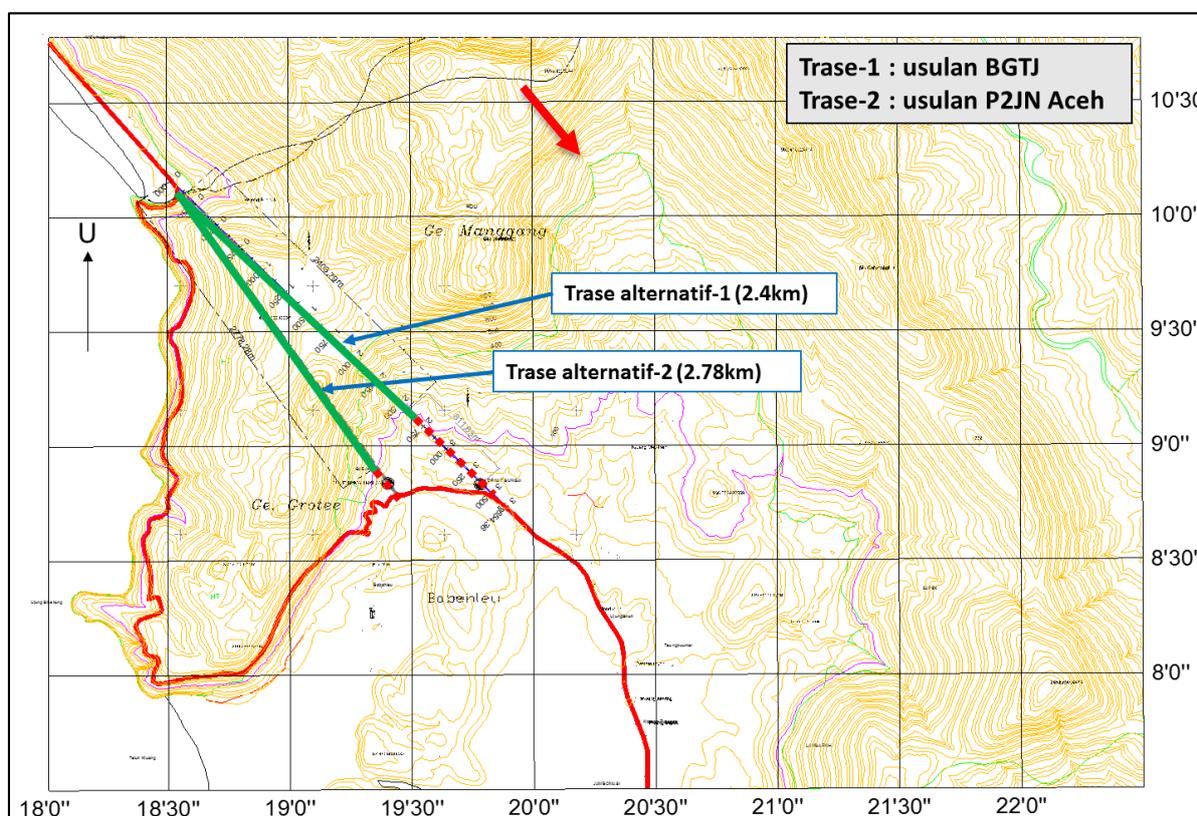
Keywords: rock tunnel, geotechnical analysis, face stability, finite element method NATM, JSCE, rock bolt, shotcrete.

1. PENDAHULUAN

Terowongan adalah suatu tempat perpindahan alternatif yang berada di bawah permukaan tanah atau gunung. Pembangunan terowongan Geurutee ini diharapkan dapat mengurangi angka kecelakaan, mempercepat arus lalu lintas dan melancarkan proses pengangkutan barang ke wilayah barat selatan Aceh. Metode konstruksi menggunakan metode NATM disebabkan untuk mencegah terjadinya keruntuhan di muka terowongan ketika proses konstruksi. Penggalan dengan metode JSCE memilih cara membagi proses penggalan pada terowongan tersebut untuk mencegah keruntuhan pada saat proses penggalan.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis geoteknik terowongan batuan. Agar metode konstruksi dan penggalan yang akan diterapkan sesuai dengan kondisi aslinya, maka dibutuhkan perhitungan yang tepat dengan melakukan pemodelan terlebih dahulu. Pada studi kasus tugas akhir ini digunakan program PLAXIS 3D AE yang berbasis metode elemen hingga.

Manfaat penelitian ini, yaitu dapat menambah pengetahuan untuk menganalisis dan mengolah data tanah dan batuan di suatu tempat juga dapat mendesain terowongan (*tunnel*) untuk jalan raya pada kondisi batuan tertentu. **Gambar 1** merupakan gambar rencana trase terowongan Geurutee.



Gambar 1. Perencanaan trase Terowongan Geurutee
(Sumber: Balai Geoteknik, 2015)

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Terowongan

Terowongan sebagai prasarana transportasi 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 Metode Penggalian Terowongan

Kondisi tanah atau batuan dilapangan dan kondisi trase eksisting di lokasi konstruksi terowongan, mengakibatkan dibutuhkan metode penggalian terowongan sesuai dengan kondisi-kondisi tersebut. Berikut di bawah ini merupakan jenis-jenis metode penggalian terowongan:

1. Ledakan dan Bor (*Drill and Blast*).
2. *Tunnel Boring Machine* (TBM).
3. *Roadheader*.
4. *New Austrian Tunneling Methode* (NATM).

2.3 Rock Mass Rating (RMR)

Rock Mass Rating (RMR) atau juga dikenal dengan Geomechanics Classification dikembangkan oleh Bieniawski pada tahun 1972-1973. Metode klasifikasi RMR merupakan metode yang sederhana dalam penggunaannya, dan parameter-parameter yang digunakan dalam metode ini dapat diperoleh baik dari data lubang bor maupun dari pemetaan struktur bawah tanah. Tujuan dari system RMR adalah untuk mengklasifikasi kualitas massa batuan dengan menggunakan data permukaan, untuk memandu metode penggalian dan juga untuk memberikan rekomendasi penggalian menggunakan perkuatan sementara dengan tanpa perkuatan sementara.

2.3.1 Klasifikasi Massa Batuan Metode RMR

Dalam mengklasifikasikan massa batuan berdasarkan sistem klasifikasi RMR, Bieniawski menggunakan enam parameter utama yang dijumlahkan untuk memperoleh nilai total RMR, yaitu :

1. *Uniaxial Compressive Strength* (UCS).
2. *Rock Quality Designation* (RQD).
3. Jarak antar (spasi) kekar (*Spacing of discontinuities*).
4. Kondisi kekar (*Condition of discontinuities*).
5. Kondisi air tanah (*Groundwater conditions*).
6. Orientasi Kekar (*Orientation of discontinuities*).

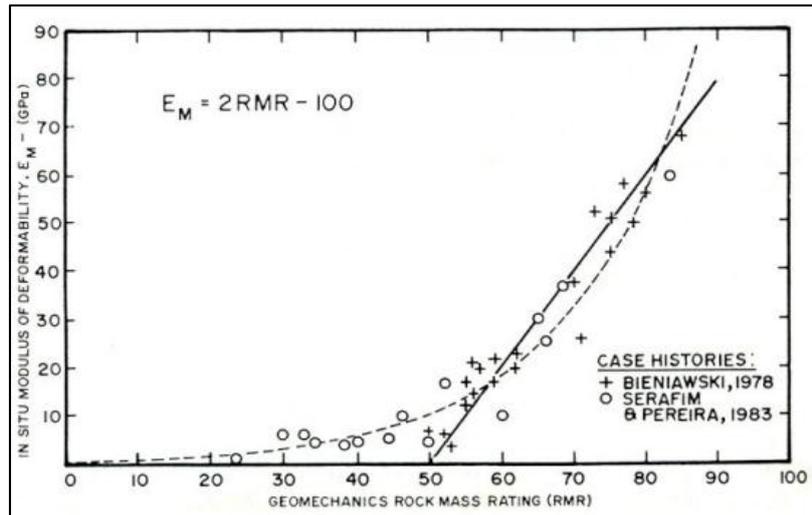
2.3.2 Penggunaan Rock Mass Rating (RMR)

Kondisi massa batuan dievaluasi untuk setiap bidang diskontinu yang ada (Bieniawski, 1989). RMR dapat digunakan sebagai panduan memilih penyangga terowongan. Panduan ini tergantung pada beberapa faktor seperti kedalaman lubang bukaan dari permukaan, ukuran dan bentuk terowongan serta metode penggalian yang akan di pakai (Bieniawski, 1989) dibawah ini **Tabel 1** dari RMR (setelah Bieniawski, 1989).

Tabel 1. Rock Mass Rating System (after Bieniawski, 1989)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point load strength index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compressive test is		
		Uniaxial comp. strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
Rating			15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surface, not continuous, no separation, unweathered wall rock	Slightly rough, surfaces, separation < 1 mm, slightly weathered walls	Slightly rough, surfaces, separation < 1 mm, highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground Water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		joint water press / major principal	0	< 1,0	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		General conditions	Completely Dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATING									
Rating			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2,5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY CONDITIONS									
Discontinuity length			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation			None	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Rating			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90 (Deg)			Drive with dip - Dip 20 - 45 (Deg)		Dip 45 - 90 (Deg)		Dip 20 - 45 (Deg)		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive againts dip - Dip 45 - 90 (Deg)			Drive againts dip - Dip 20 - 45 (Deg)		Dip 0 - 20 - Ireespective of strike (Deg)				
Fair			Unfavourable		Fair				

Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh
Menggunakan Metode Elemen Hingga



Gambar 2. Kolerasi antara Emdengan RMR
(Sumber: 2007.-Evaluation-of-the-formation-modulus-of-rock-masses-using-RMR)

Pada **Gambar 2** merupakan hubungan antara modulus elastisitas batuan dengan nilai RMR menurut Bienawski dan Sefarin & Preira.

1. Formula Bieniawski (1978) untuk batuan keras ($RMR > 50$), dapat dilihat pada **Persamaan 1**

$$E_m = 2 RMR - 100 \text{ GPa} \quad \dots (1)$$

2. Formula Serafin dan Pereira (1983) untuk batuan keras ($RMR < 50$), dapat dilihat pada **Persamaan 2**

$$E_m = \pi r^2 = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}} \quad \dots (2)$$

3. Modulus Elastisitas (E_i), didapat pada formula, dapat dilihat pada **Persamaan 3**

$$E_m = E_i . RMF \quad \dots (3)$$

4. Dimana nilai *Modulus Reduction Factor* (RMF) menurut Nicholson dan Bieniawski (1990), dapat dilihat pada **Persamaan 4**

$$RMF = E_m / E_i = 0,0028 RMR^2 = \pi r^2 + 0,9 . e^{(RMR/22,82)} \quad \dots (4)$$

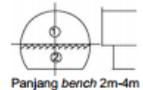
1.4 Japanese Society of Civil Engineer (JSCE)

Pedoman metode perencanaan penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan pada media campuran tanah-batuan di Indonesia umumnya menggunakan JSCE dikarenakan metode ini dapat menjadi acuan untuk perencanaan penggalian terowongan jalan di media campuran tanah-batuan.

2.4.1 Metode Penggalian

Tipikal ilustrasi penampang melintang penggalian berdasarkan pembagian muka bidang galian, kondisi media yang sesuai dan kategori batuan/tanah dapat dilihat pada **Tabel 2** dengan tahapan penggalian mengacu pada penomoran menggunakan nomor terkecil yang menjadi urutan penggalian pertama yang dilakukan.

Tabel 2. Pemilihan Metode Penggalian dan Karakteristiknya

Metode penggalian	Pembagian muka bidang galian	Kondisi media yang sesuai	Kategori batuan/tanah	Kelebihan	Kekurangan
Penggalian seluruh muka bidang galian dengan bench tambahan	 Panjang bench 2m-4m	<ul style="list-style-type: none"> Media batuan/tanah dengan kondisi yang cukup stabil, tetapi penggalian dengan metode seluruh muka sulit untuk dilakukan Media batuan/tanah yang bagus, tetapi diselingi dengan media yang buruk 	CI dan CII	<ul style="list-style-type: none"> Hemat tenaga kerja karena penggalian bagian atas dan bawah dilakukan secara mekanis dan paralel Manajemen konstruksi termasuk pengendalian keamanan lebih mudah karena penggalian muka bidang galian dilakukan bertahap 	<ul style="list-style-type: none"> Jika muka bidang galian menjadi tidak stabil, sulit untuk mengganti dengan metode penggalian lainnya.
Metode penggalian dengan bench	Metode penggalian dengan bench panjang	<ul style="list-style-type: none"> Media yang cukup stabil, tetapi metode seluruh muka bidang galian sulit untuk dilakukan Metode penggalian cincin (<i>ring cut</i>) diterapkan jika muka bidang galian tidak stabil 	DI dan DII	<ul style="list-style-type: none"> Penggalian bagian atas <i>heading</i> dan bench yang dilakukan bergantian dapat mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja 	<ul style="list-style-type: none"> Penggalian yang bergantian akan memperpanjang masa konstruksi
	Metode penggalian dengan bench pendek	<ul style="list-style-type: none"> Metode penggalian cincin (<i>ring cut</i>) diterapkan jika muka bidang galian tidak stabil 		<ul style="list-style-type: none"> Dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi media Penggalian bagian atas <i>heading</i> dan bench yang bergantian mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja 	<ul style="list-style-type: none"> Penggalian paralel menyulitkan untuk menyeimbangkan siklus konstruksi <i>heading</i> dan bench Penggalian yang bergantian akan memperpanjang masa konstruksi
	Metode penggalian dengan bench kecil	<ul style="list-style-type: none"> Jika diperlukan pengendalian konvergensi <i>Squeezing ground</i> yang memerlukan penutupan dini dari penampang penggalian Metode penggalian cincin (<i>ring cut</i>) diterapkan jika muka bidang galian tidak stabil 		<ul style="list-style-type: none"> Penutupan (<i>closure</i>) lebih awal dengan memasang lantai kerja mudah untuk dilakukan Penggalian bagian atas <i>heading</i> dan bench yang bergantian mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja 	<ul style="list-style-type: none"> Pemilihan peralatan konstruksi cenderung menjadi terbatas jika direncanakan untuk bekerja pada dasar <i>heading</i> bagian atas
	Metode penggalian dengan bench ganda	<ul style="list-style-type: none"> Media yang cukup bagus untuk terowongan dengan penampang yang tinggi dan besar Media yang buruk dan memerlukan bagian kecil <i>heading</i> untuk menstabilkan muka bidang galian 		<ul style="list-style-type: none"> DII dan E 	<ul style="list-style-type: none"> Muka bidang galian dapat dengan mudah distabilisasi

(Sumber : *Japanese Society of Civil Engineer (JSCE)*)

3. ANALISIS DATA

3.1 Data Terowongan

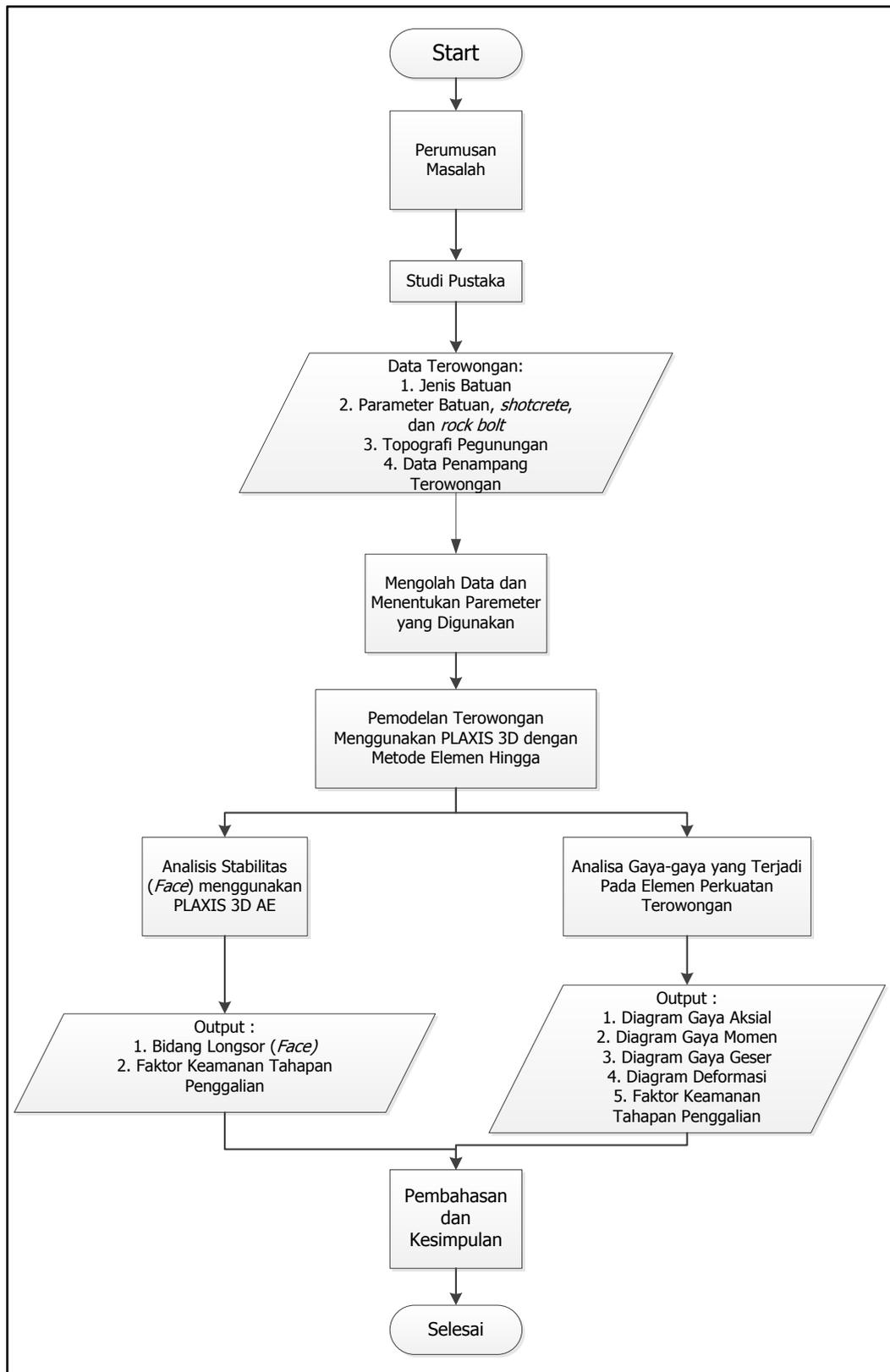
Pada pemodelan terowongan, dibutuhkan data berupa jenis tanah, jenis batuan, parameter tanah, parameter batuan, topografi pegunungan dan data penampang terowongan. Berikut data-data teknis yang di dapat untuk pemodelan terowongan:

1. Jenis batuan : Breksi Granitik
2. Parameter batuan : $\gamma_{unsat}, \gamma_{sat}, c, \phi, E', v'$
3. Parameter *shotcrete* : d, γ, E, v
4. Parameter *rock bolt* : $\gamma, E, \emptyset, pile\ type$

3.2 Diagram Alir Metodologi Analisis

Metodologi analisis yang dijadikan dasar studi ini dapat dijabarkan dalam bentuk diagram alir (*flow chart*) pada **Gambar 3**. Diawali dari perumusan masalah, studi pustaka yaitu tahap pengumpulan bahan – bahan seperti referensi persiapan, data terowongan seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, Parameter dan pengolahan data dimana parameter didapat dari uji lab maupun lapangan, pemodelan terowongan pada PLAXIS 3D yaitu memodelkan geometri bentuk penampang terowongan sesuai dengan gambar rencana, dari hasil perhitungan PLAXIS 3D didapat dua jenis hasil yaitu hasil dari stabilitas berupa *face stability*, faktor keamanan dan hasil dari gaya-gaya yang terjadi berupa deformasi, gaya aksial, gaya geser, dan momen. Terakhir dari diagram alir berupa pembahasan dan kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan.

Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga



Gambar 3. Diagram alir metodologi analisis

Data parameter batuan, diperoleh dari sampel yang telah di ambil dari tempat yang akan di tinjau. **Tabel 3** menunjukkan data parameter batuan di gunung Geurutee Aceh.

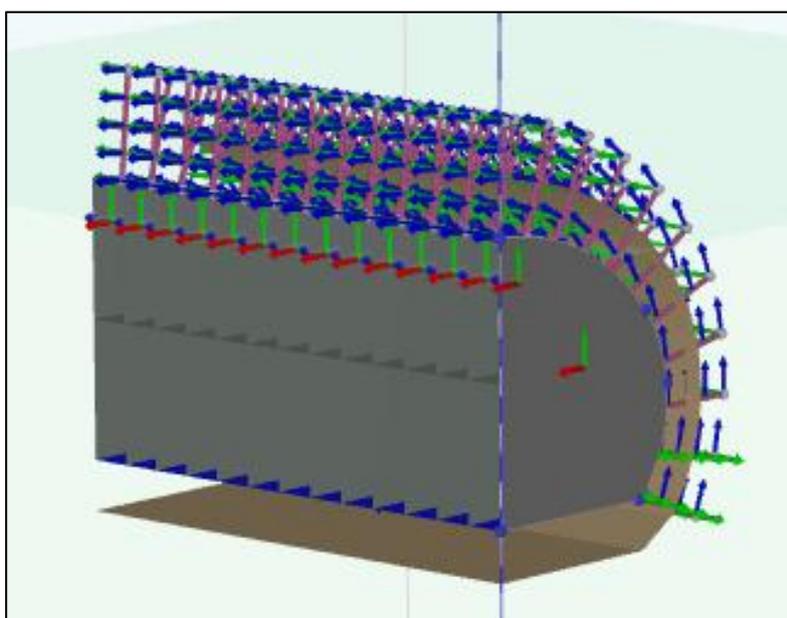
Tabel 3. Parameter Batuan di Titik BT-2 Gunung Geurutee Aceh

Lapisan	Jenis Batuan	RQD (%)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ν	E (kN/m ²)	C (kN/m ²)	ϕ (°)
1	Breksi Granitik	24 -73	26,6	26,7	0,15	6,3E5	250	30
2	Breksi Granitik	74 - 98	24,9	25,2	0,15	1,9E6	350	40

(Sumber: Balai Geoteknik, 2015)

3.3 Pemodelan Geometri Terowongan Pada PLAXIS 3D AE

Desain bentuk penampang terowongan dimodelkan separuh dari bentuk aslinya dikarenakan simetris dan model materialnya sudah disederhanakan sehingga tidak didesain utuh. **Gambar 4** merupakan desain struktur terowongan dengan panjang 19,5 m dan perkuatan sementara pada PLAXIS 3D AE.

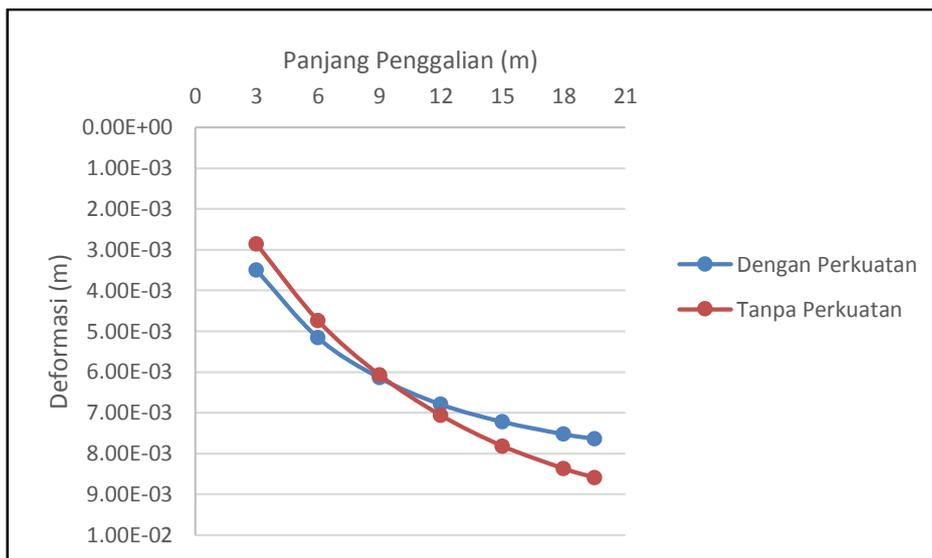


Gambar 4. Desain struktur Terowongan Geurutee pada PLAXIS 3D AE

3.4 Hasil Perhitungan PLAXIS 3D AE

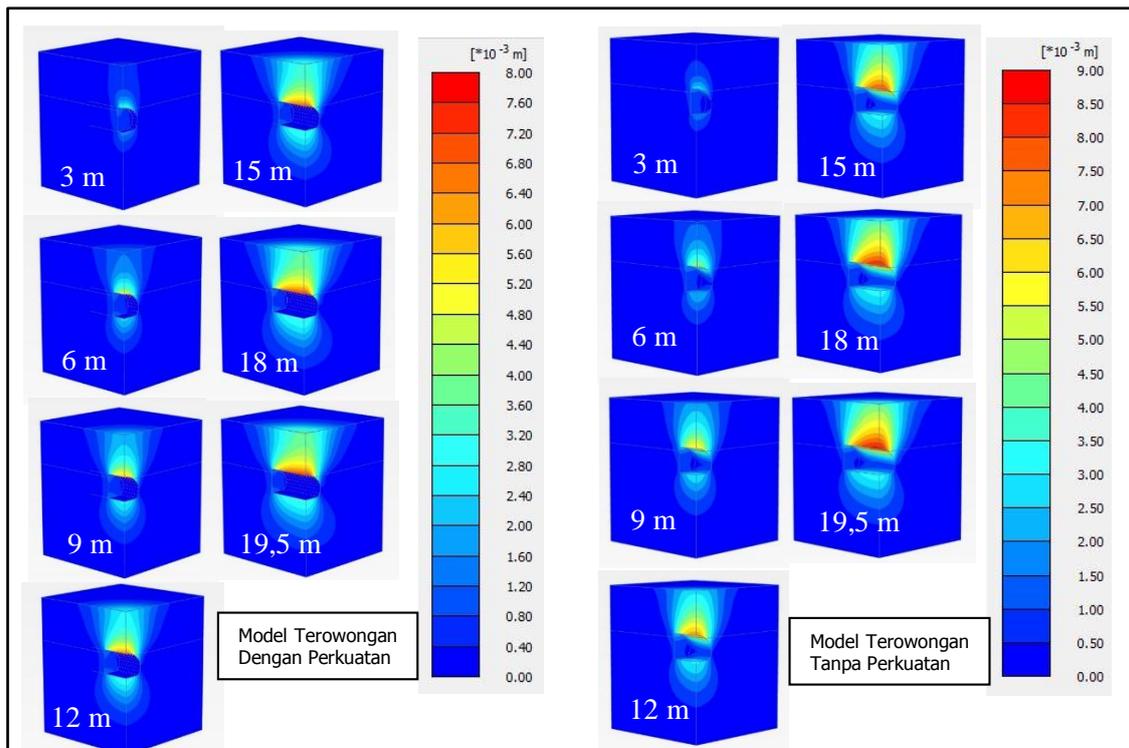
Hasil perhitungan yang diambil dari pemodelan terowongan Geurutee yaitu nilai *Total Displacement*, *Shear Force*, *Axial Force*, *Moments*, dan *Safety Factor*. Nilai *Displacement* akan dibandingkan antara pemodelan terowongan dengan perkuatan sementara dan pemodelan terowongan tanpa perkuatan sementara. **Gambar 5** merupakan hasil perhitungan output PLAXIS 3D AE. Dibawah ini merupakan grafik hasil *total displacement* tiap panjang penggalian 3 m penggalian.

Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh
Menggunakan Metode Elemen Hingga



Gambar 5. Perbandingan deformasi pemodelan terowongan dengan perkuatan sementara dan tanpa perkuatan

Dari **Gambar 5** tersebut dapat di lihat terowongan dengan perkuatan sementara lebih kecil terjadi deformasi dibandingkan tanpa perkuatan sementara, dimana dengan perkuatan terdeformasi sebesar $7,64E-03$ m, sedangkan tanpa perkuatan sebesar $8,60E-3$ m. Perbedaan deformasi yang kecil dikarenakan kondisi batuan pada Pegunungan Geurutee terbilang mantap sehingga dengan perkuatan sementara pun perbedaan deformasi tidak terlalu signifikan. Hasil perhitungan PLAXIS 3D AE tiap panjang galian dapat dilihat pada **Gambar 6**.



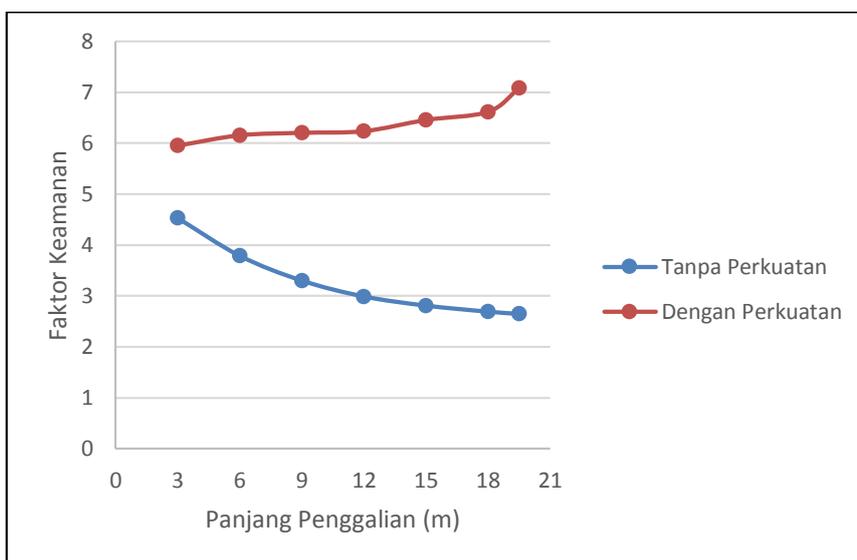
Gambar 6. Deformasi hasil perhitungan PLAXIS 3D AE

Hasil perhitungan selanjutnya berupa nilai gaya geser, gaya aksial, dan momen. Gaya - gaya dalam tersebut dapat dilihat pada struktur perkuatan sementara dan nilai gaya gaya dalam tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Gaya - Gaya Dalam PLAXIS 3D AE

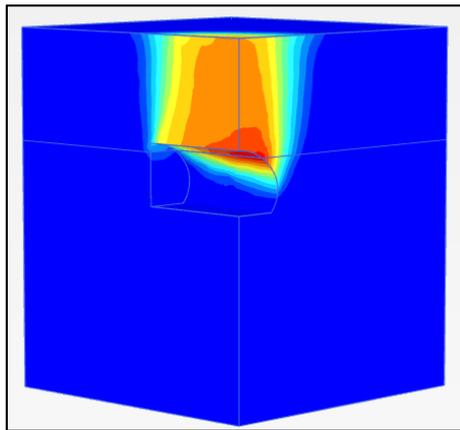
Tahap Galian (m)	Shear Force		Axial Force		Moments	
	Min (kN/m)	Max (kN/m)	Min (kN/m)	Max (kN/m)	Min (kNm/m)	Max (kNm/m)
3	-78,65	93,54	-197,2	138,6	-2,788	16,92
6	-136,4	98,92	-361,1	182,4	-4,335	21,46
9	-164,3	94,27	-445,2	183,4	-6,804	22,73
12	-183,7	97,34	-496,2	193,2	-6,559	24,57
15	-196,2	92,96	-526,1	155,1	-6,492	24,85
18	-205,3	98,19	-545	150,9	-6,442	25
19.5	-208,2	65,94	-551,7	142	-6,426	25,32

Dari **Tabel 4** dapat dilihat nilai *Shear Force* terbesar yaitu -208,2 kN/m terjadi pada sistem perkuatan sementara ketika sistem perkuatan sementara terpasang pada panjang 19,5 m karena jika penampang lebih luas maka gaya geser yang terjadi pun lebih besar. Sama halnya *Axial Force* terbesar terjadi pada perkuatan sementara yang terpasang pada panjang 19,5 m sebesar -551,7 kN/m. Momen dominan terjadi pada atap terowongan karena bagian atas, momen terbesar 25,32 kN m/m ketika perkuatan sementara terpasang pada pajang 19,5 m.



Gambar 7. Nilai SF terhadap tahapan penggalian tanpa perkuatan

Pada **Gamba 7** menyimpulkan bahwa pada panjang Penggalian 3 m nilai faktor keamanan (FK) 4,525 lebih besar dari panjang penggalian 19,5 m yaitu 2,644 karena, pada tahap awal penggalian batuan yang tergali tidak sebanyak setelah tergali di 19,5 m sehingga kemungkinan terjadi keruntuhan sangat kecil, sehingga nilai FK di panjang penggalian 3 m lebih besar dari panjang penggalian 19,5 meski pada penggalian tersebut masih aman karena syarat nilai FK untuk batuan dikatakan aman jika > 1,5 . Terakhir adalah pola keruntuhan *face stability* yang terjadi pada pemodelan terowongan Geurutee ketika tahapan penggalian, keruntuhan dominan terjadi pada bagian atap terowongan. **Gambar 8** merupakan tampilan dari pola keruntuhan yang terjadi pada panjang galian 19,5 m.



Gambar 8. Face stability pada pemodelan Terowongan Geurutee

4. KESIMPULAN

Besarnya deformasi yang terjadi pada terowongan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan didapat nilai deformasi yang tidak jauh berbeda dikarenakan kondisi massa batuan pegunungan Geurutee terbilang mantap.

Gaya dalam yang terjadi gaya aksial, gaya geser, dan momen terbesar pada perkuatan sementara setelah terpasang 19,5 m karena makin luas penampang maka beban yang diterima pun lebih besar.

Kedua model memiliki nilai SF yang di atas batas aman selama panjang terowongan tersebut 19,5 m tetapi, pemodelan tanpa perkuatan sementara diperkirakan akan mengalami penurunan nilai SF sampai < 2 pada penggalian selanjutnya, sehingga pemodelan terowongan tanpa perkuatan sementara tidak dianjurkan. Pada metode konstruksi sesungguhnya di lapangan terowongan tanpa perkuatan tidak dianjurkan karena dari faktor akibat *blasting* yang memungkinkan terjadinya keruntuhan pada tahap penggalian terowongan tersebut.

DAFTAR RUJUKAN

- Broere, W. (2001). Tunnel Face Stability & New CPT Application. ISBN 90-407-2215-3 DUP Science. Netherlands.
- Han Kim, Seung. (2010). Large Tunnels for Transportation Purposes and Face Stability of Mechanically Driven Tunnels in Soft Ground. Austin: The University of Texas.
- Hoek, Evert. (2006). Pratical 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. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- U.S. Departement of Transportation Federal Highway Administration. (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements. Washington D.C: National Highway Institute.