



Analisis Kekuatan Massa Batuan dan Stabilitas Lereng *Intake* Bendungan Bener Berdasarkan Metode Empiris, Analitis, dan Numerik

Muhammad Satya Himawan Danuartha^{1,2*}, Hendratama Widiyanto^{1,2}

¹Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro

²PT Virama Karya

Abstrak

Berdasarkan hasil redesain terowong pengelak Bendungan Bener memiliki panjang trase ± 853 m, dengan tinggi lereng *intake* dan *inlet* sebesar 130 m. Fungsi bendungan ini selama konstruksi berlangsung digunakan untuk mengalihkan aliran Sungai Bogowonto, tetapi ketika operasional berfungsi sebagai bangunan pengambilan untuk air baku dan PLTA. Penelitian ini menyajikan hasil investigasi geologi teknik galian *intake* dan portal *inlet* terowong pengelak Bendungan Bener. Karakteristik massa batuan diperoleh dari pemetaan geologi teknik (*scanline*). Sifat indeks dan keteknikan batuan diperoleh dari hasil laboratorium sampel batuan. Analisis stabilitas lereng pada *intake* dengan metode empiris dilakukan berdasarkan klasifikasi massa batuan, metode analitis berdasarkan metode ambang batas kesetimbangan, metode numerik berdasarkan metode elemen hingga. Investigasi geologi menunjukkan lokasi terowongan tersusun oleh breksi andesit, yang merupakan bagian dari Formasi Kebo Butak. Massa batuan pada area studi galian *intake* dominan segar dan lapuk ringan berdasarkan *Rock Mass Rating*, RMR juga diklasifikasikan sebagai massa batuan kelas I (massa batuan sangat bagus) dan kelas II (massa batuan bagus). Berdasarkan *Slope Mass Rating*, desain lereng *inlet* berada pada kelas II (stabil). Hasil analisis stabilitas sumbu utama lereng *intake* alami dan setelah penggalian menggunakan metode ambang batas kesetimbangan dan metode elemen hingga berada pada kondisi aman (Faktor keamanan $> 1,5$).

Kata kunci: *intake*; massa batuan; RMR; SMR; stabilitas; faktor keamanan

Abstract

Based on Bener Dam diversion tunnel redesign result, the pathway is ± 853 m long and 130 m high at inlet and intake slope. The function during construction is to divert Bogowonto River stream, however during operational period, it has turned for irrigation and power supply. This paper presents engineering geology investigation results at intake and inlet portal excavation area of Bener Dam. Characterization of rock mass was carried out from engineering geology mapping (*scanline*). Rock index and engineering properties were carried out from laboratory data of intact rock. Intake slope stability analysis was conducted by empiric method based on rock mass classification, analytic method based on limit equilibrium method, and numeric method based on finite element method. Geological investigation showed the tunnel site is consisted of andesite breccia, part of Kebo Butak Formation. Rock mass at study area are fresh to slightly weathered rock based on *Rock Mass Rating*, RMR also classified as class I (very good rock mass) and class II (good rock mass). Based on *Slope Mass Rating*, SMR inlet slope design is class II (stable). Stability result of center line intake natural slope and after excavation limit equilibrium and finite element method are stable (factor of safety $> 1,5$).

Keywords: *intake*; rock mass; RMR; SMR, stability, factor of safety

*) Korespondensi: satyahimawan@gmail.com

Diajukan : 4 Mei 2021

Diterima : 28 Desember 2021

Diterbitkan : 20 April 2022

PENDAHULUAN

Intake atau bangunan pengambilan pada Bendungan Bener akan bertumpu pada bukit galian *inlet* terowong pengelak. Lokasi portal terowongan terletak pada Formasi Kebo Butak (Rahardjo dkk., 1995). Galian tersebut memiliki ketinggian sebesar 128 m dimulai dari elevasi +353 m hingga elevasi dasar portal *inlet* terowongan berada pada elevasi +225 m.

Penelitian relevan yang pernah dilakukan oleh Sasangka dkk. (2019) adalah melakukan analisis stabilitas lereng *inlet* portal terowongan dan mengusulkan galian yang optimal, dengan desain *intake* tipe *shaft*, sedangkan pada makalah ini mengacu pada desain *intake* dan pengujian sampel batuan pada galian *intake* yang terbaru. Perubahan desain *intake* menjadi tipe *inclined intake* telah disetujui bersama di dalam sidang teknis dengan tim Komisi Keamanan Bendungan.

Bangunan atau *struktur intake* tidak akan langsung dibangun di atas pondasi galian *intake* tersebut hingga pengerjaan galian dengan *blasting* di area bendungan selesai dilaksanakan (rencana dalam kurun waktu ± 2 tahun). Pemasangan pondasi permanen seperti *bored pile* dan beton massa tidak akan langsung dikerjakan agar tidak timbul retakan pada struktur dan pondasi permanen bangunan yang dibangun akibat getaran *blasting*. Oleh karena itu rencana proteksi lereng *intake* mengandalkan perkuatan primer berupa *shotcrete* dan *rockbolt* hanya pada sayap *intake*, sedangkan sumbu utama tidak diproteksi.

Dimensi beda tinggi galian *intake* dengan *inlet* terowongan sebesar ± 130 m. Kemiringan galian sayap *intake* sebesar 1: 0,636 dan kemiringan galian sumbu utama *intake* adalah sebesar 1:1,112. Geometri galian pondasi yang besar, kondisi lapangan dengan curah hujan tinggi, dan galian sumbu utama *intake* yang tidak diproteksi dapat menjadi faktor penyebab tidak stabilnya lereng galian. Oleh karena itu perilaku mekanika batuan pada lereng galian *intake* dan potensi kegagalan lereng yang dapat terjadi perlu dievaluasi. Di dalam desain perencanaan geoteknik perlu dipastikan nilai stabilitas galian *intake* tersebut aman berdasarkan standar SNI 8460-2017, yaitu Nilai Faktor Keamanan $> 1,5$ (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Penelitian ini akan membahas kestabilan galian *intake* terutama pada sumbu utama galian menggunakan pendekatan empiris berdasarkan klasifikasi massa batuan SMR (*Slope Mass*

Rating) yang merupakan pengembangan dari klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) (Romana, 1985). Pendekatan empiris tersebut akan dikombinasikan dengan metode numerik karena kombinasi pendekatan tersebut akan memberikan hasil yang optimal di dalam analisis stabilitas (Gurocak, 2010). Metode numerik yang digunakan berdasarkan analisis ambang batas kesetimbangan dan analisis elemen hingga SRF (*Safety Reduction Factor*).

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini terletak di Desa Kemiri, Kecamatan, Kabupaten Wonosobo. Lokasi galian *intake* terowongan secara astronomis berdasarkan WGS 1984 zona 49 S berada pada koordinat 391631; 9160353. Kesampaian lokasi dari Bandara NYIA sekitar satu setengah jam. *Dam site* dapat dicapai dari selatan melalui Jalan Salaman Purworejo, pada pertigaan Maron belok ke arah barat laut menuju arah Kabupaten Wonosobo (Gambar 1). Lokasi penelitian difokuskan pada terowong pengelak Bendungan Bener khususnya pada bagian *inlet* (Gambar 2).

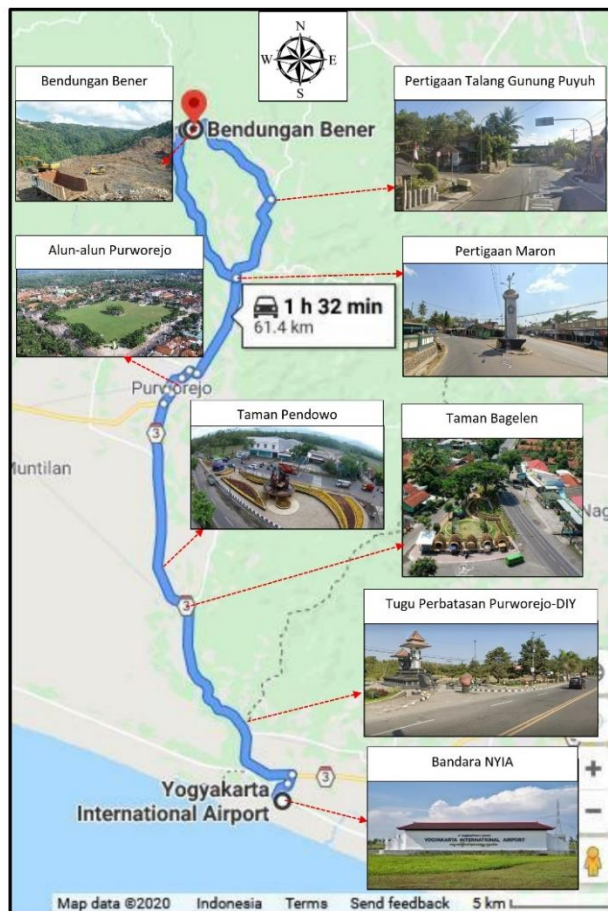
Kondisi Geologi dan Geologi Teknik

Lokasi terowongan terletak pada litologi breksi andesit dengan *sheeting joint* pada beberapa titik galian *intake*. Breksi andesit ini tersusun oleh fragmen dan matriks, dengan tekstur fragmen porfiritik, dan hubungan butir matriks hipidiomorfik granular. Breksi Andesit merupakan batuan vulkanik dengan mineral penyusun pada fragmen terdiri dari plagioklas, hornblende, mineral opak, dan mineral oksida serta pada massa dasar tersusun oleh terdiri dari gelas, plagioklas, dan mineral lempung.

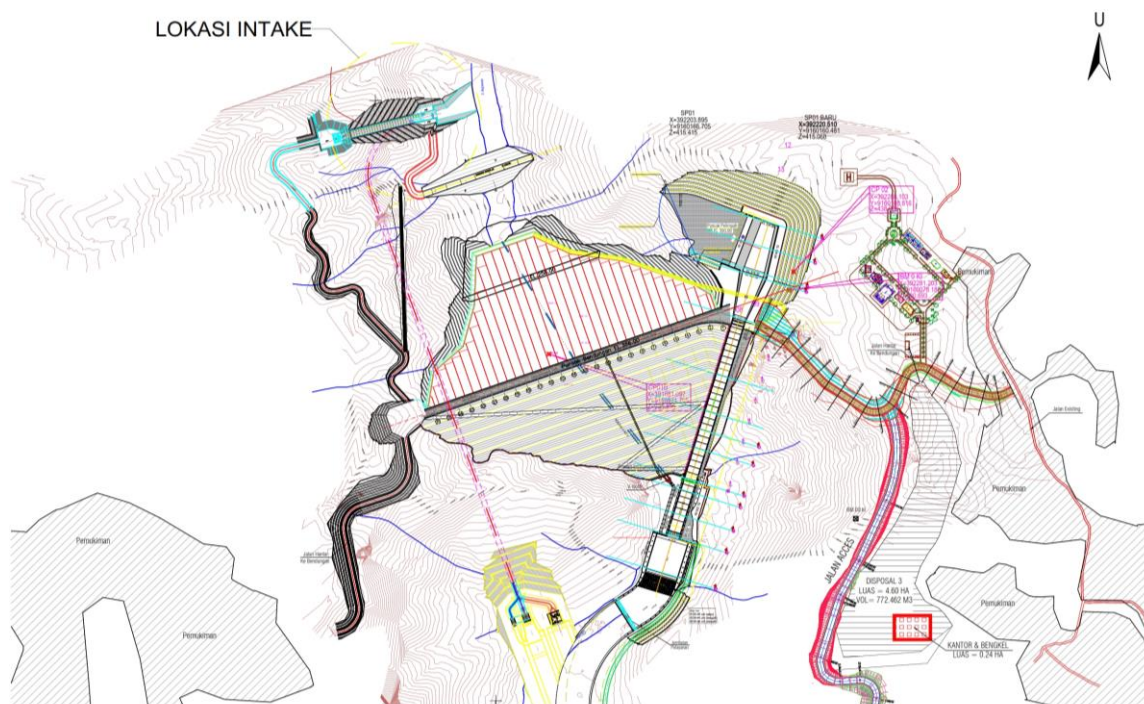
Kondisi Geologi Teknik pada galian *intake* terdiri dari breksi andesit dengan kelas massa batuan sangat baik, baik, sedang, dan buruk. Dengan tingkat pelapukan segar, sedikit lapuk, sedang, dan lapuk kuat. Rangkuman parameter sifat indeks dan sifat mekanika batas yang digunakan pada analisis ambang batas kesetimbangan dan elemen hingga terdapat pada Tabel 1.

Studi Literatur

Analisis kinematik tipe gerakan massa batuan ditentukan dengan metode empiris mengacu pada klasifikasi SMR (Romana, 1985). Nilai SMR diperoleh berdasarkan RMR (Bieniawski, 1989)



Gambar 1. Kesempaian lokasi penelitian di Bendungan Bener, Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah



Gambar 2. Denah detil Bendungan Bener

dengan beberapa faktor penyesuaian seperti pola diskontinuitas pada massa batuan dan orientasi dari lereng. Metode ekskavasi juga merupakan faktor yang disesuaikan (Tabel 2).

Analisis ambang batas kesetimbangan berfungsi untuk menentukan Faktor Keamanan (FK) dari potensi bidang gelincir pada tanah longsor (*land slide*) dengan tujuan untuk melakukan analisis kestabilan lereng (Abramson dkk., 2002). Analisis metode elemen hingga memperoleh nilai keamanan dengan menggunakan SRF atau faktor keamanan lereng yang menunjukkan batasan nilai lereng terhadap longsor (Hammah dkk. 2004).

Analisis Empiris *Slope Mass Rating* untuk Desain Lereng

Menurut Romana (1985), SMR merupakan pendekatan empiris untuk menentukan stabilitas

lereng batuan. Klasifikasi tersebut akan digunakan pada lokasi penelitian. Analisis stabilitas pada desain lereng membutuhkan data geometri portal terowongan (Tabel 3), data kualitas massa batuan dan data hasil analisis kinematik *Slope Mass Rating* di daerah intake (Tabel 3 dan Tabel 4).

Data lapangan digunakan untuk menentukan parameter dalam analisis SMR seperti F1, F2, F3. Parameter yang ditunjukkan pada nilai F1 = 0,15; F2 = 1; F3 = 0 dan F4 (metode ekskavasi pada normal blasting)= 0. Data tersebut menunjukkan bahwa lereng diklasifikasikan sebagai kelas II (Romana, 1985) dan IIb (Singh dan Goel, 2011), menunjukkan bahwa lereng hanya membutuhkan perkuatan *wiremesh* dan *shotcrete* serta *rock bolt* lokal.

Tabel 1. Ringkasan sifat indeks dan parameter keteknikan breksi andesit pada lokasi penelitian

Litologi	Derajat Pelapukan	Rata-rata Berat Jenis (MN/m ³)	Spesific Gravity	Is 50 (MPa)	Kuat Tekan (MPa)	E (Young Modulus)	Poissons ratio
Breksi Andesit	Lapuk ringan-segar	0,025	2,76	3,12	31.4	14855	0,274

Tabel 2. Pemberian bobot nilai F1, F2, dan F3 (Romana,1985)

Kasus kegagalan lereng		Sangat Baik	Baik	Sedang	Tidak Baik	Sangat Tidak Baik
P	$I\alpha_j - \alpha_s I$					
T	$I\alpha_i - \alpha_s - 180^\circ I$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
W	$I\alpha_i - \alpha_s I$					
P/W/T	F1	0.15	0.4	0.7	0.85	1
P	β_j	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
W	β_i					
P/W	F2	0.15	0.4	0.7	0.85	1
T	F2	1	1	1	1	1
P	$I\beta_j - \beta_s I$					
W	$I\beta_i - \beta_s I$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<-10°
T	$I\beta_j + \beta_s I$	<110°	<110-120°	>120°	-	-
P/W/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

P = Planar Failure; T = Toppling Failure; W = Wedge Failure; α_j = Joint Strike; α_s = Slope Strike; α_i = Plunge direction of line of intersection; β_j = Joint Dip; β_s = Slope Dip; β_i = Plunge of line intersection

Tabel 3. Data desain lereng

Posisi	Data Desain Lereng			
	Arah Lereng	Jurus Lereng	Overall Dip Slope	Tinggi Lereng (m)
Inlet Terowongan	60	320	60	130

Tabel 4. Hasil survey *scanline* pada galian *intake*

STA	01	02	03	04	05	06	07
RMR	69	56	70	72	65	43	60
GSI	64	51	65	67	61	38	55
Main Strike(°)				275			
Main Dip (°)				80			

Hipotesis

Berdasarkan kondisi geologi, *inlet* terowongan (kondisi asli dan lereng desain) berada dalam kondisi aman. Setelah digali berdasarkan desain galian pondasi *intake* maka nilai faktor keamanan akan turun dibandingkan kondisi alami, namun masih di atas ambang batas faktor keamanan yang dipersyaratkan.

METODOLOGI

Tahapan dalam menjalankan metode penelitian sebagai berikut :

1. Pengumpulan data di sekitar *inlet* terowongan dan galian *intake* untuk menentukan nilai RMR, perhitungan dengan penyesuaian faktor untuk menentukan nilai SMR lereng *inlet* terowongan.
2. Penentuan nilai keamanan dengan analisis pemodelan ambang batas dan elemen hingga berdasarkan data geometri lereng, sifat indeks, dan parameter keteknikan massa batuan pada lereng pondasi *intake*. Geometri kemiringan galian lereng yang digunakan mengacu pada potongan sumbu utama *intake* (1:1,112) .
3. Nilai kuat tekan batuan (UCS) dan modulus *young* sebagai input parameter kekuatan massa batuan dengan tipe keruntuhan material berdasarkan *Generalized Hoek Brown* (Hoek dkk., 2013). Hasil uji *triaxial* batuan yaitu nilai kohesi dan sudut gesek dalam digunakan sebagai input parameter keruntuhan material berdasarkan *Mohr-Coulomb*. Nilai berat jenis yang diperoleh dari pengujian sifat indeks batuan akan digunakan sebagai input pada pemodelan.

HASIL

Analisis Ambang Batas untuk Lereng Alami dan Desain Galian *Intake*

Input parameter analisis ambang batas didasarkan pada kriteria kegagalan Mohr-Coulomb. Breksi andesit dengan kualitas massa batuan yang sangat baik memiliki berat jenis 0,026 MN/m³, kohesi 3,09 MPa dan sudut gesek dalam 56,99°. Breksi andesit dengan massa batuan dengan kualitas

baik memiliki berat jenis 0,026 MN/m³, kohesi 0,732 MPa dan sudut gesek dalam 42,85. Breksi andesit dengan massa batuan kualitas sedang memiliki berat jenis 0,025 MN/m³ kohesi 0,169 MPa dan sudut gesek dalam 17,1°, Breksi andesit dengan kualitas massa batuan yang buruk memiliki berat jenis 0,021 MN/m³, kohesi 0,106 MPa dan sudut gesek dalam 14,3° (Tabel 6).

Analisis ambang batas kesetimbangan pada kondisi lereng asli (sebelum penggalian) dan lereng desain (setelah penggalian) berada pada kondisi yang stabil. Nilai kritis faktor keamanan adalah 4,971 sebelum dilakukan penggalian pondasi *intake* (Gambar 3). Setelah dilakukan penggalian berdasarkan desain lereng galian (Gambar 4) nilai kritis faktor keamanan turun menjadi 2,169.

Berdasarkan persyaratan angka keamanan yang ditentukan, dapat diketahui bahwa lereng galian *intake* berada pada kondisi stabil dan aman terhadap potensi pergerakan massa batuan. Potensi tipe gerakan massa batuan setelah lereng *intake* digali sama dengan hasil analisa kinematik SMR yaitu tipe planar.

Analisis Elemen Hingga untuk Lereng Alami dan Desain *Intake*

Input nilai sifat indeks dan parameter keteknikan untuk analisis elemen hingga berdasarkan kriteria kegagalan *Generalized Hoek Brown*. Breksi andesit dengan kualitas massa batuan yang sangat baik memiliki nilai *modulus young* sebesar 17455 MPa, *poisson ratio* 0,264, *mb* sebesar 5,07, *s* sebesar 0,12, dan *a* sebesar 0,5. Breksi andesit dengan kualitas massa batuan yang baik memiliki nilai *modulus young* sebesar 17259 MPa, *poisson ratio* 0,264, *mb* sebesar 2,57, *s* sebesar 0,014, dan *a* sebesar 0,5. Breksi andesit dengan kualitas massa batuan yang sedang memiliki nilai *modulus young* sebesar 13919 MPa, *poisson ratio* 0,3, *mb* sebesar 1,05, *s* sebesar 0,0009, dan *a* sebesar 0,51. Breksi andesit dengan kualitas massa batuan buruk memiliki nilai *modulus young* sebesar 10787 MPa *poisson ratio* 0,27, *mb* sebesar 1,05, *s* sebesar 0,0009, dan *a* sebesar 0,51.

Tabel 5. Hasil analisis SMR pada lereng *intake* terowongan

Tipe Kegagalan Lereng Kinematik	ROMANA'S FACTORS (1985)				RMR	SMR (SMR= RMR+(F1. F2.F3)+F4)	SLOPE CLASS		
	F1 I JURUS KEKAR- JURUS LERENG I	F2 IDIP KEKAR I	F3 IDIP KEKAR- DIP LERENG I	F4 I METODE EKS KAVASI			Slope Class ROMANA (1985)	SIGHN & GOEL (2011)	Reinforce- ment Recomenda tion
	270-330	80	55-80						
PLANAR	60 (Very Favourable)	80 (Very Unfavourable)	25 (Very Favourable)	Blasting dan Galian mekanis	62,14	62,14	KELAS II (massa batuan baik, Stabil, Beberapa blok gagal, kemungkinan gagal 0,2	II b	Rock bolt lokal atau sistematis, shotcrete
	0,15	1	0	0					

Rekapitulasi hasil analisis elemen hingga dapat dilihat pada Tabel 7.

Analisis metode numerik elemen hingga untuk kondisi lereng alami (sebelum penggalian) dan lereng desain (setelah penggalian) berada pada kondisi yang stabil dan aman. Nilai kritis faktor keamanan berdasarkan nilai SRF kondisi alami adalah 3,92 (Gambar 5). Setelah dilakukan penggalian berdasarkan desain lereng galian

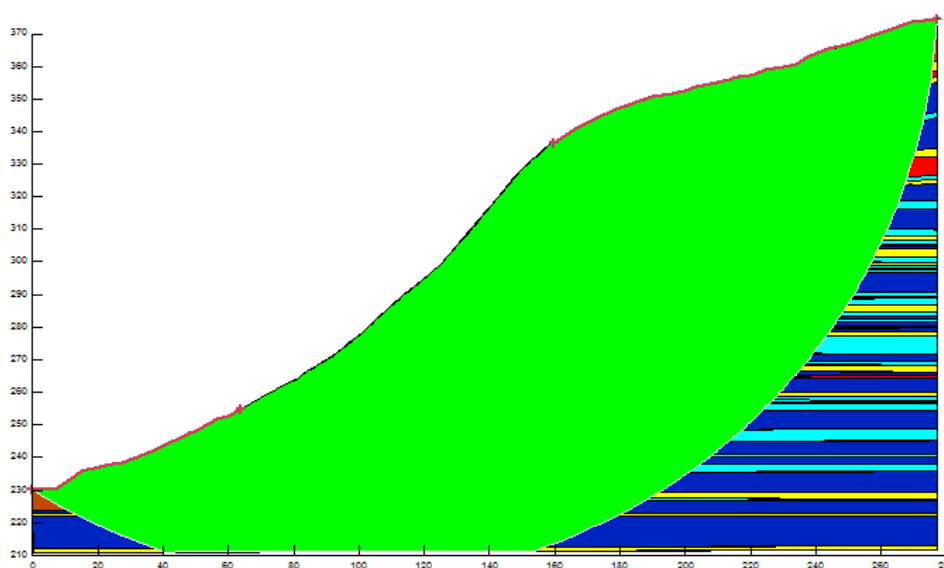
(Gambar 6) nilai kritis faktor keamanan turun menjadi 2. Hasil analisis dengan elemen hingga ini menunjukkan pola hasil yang bersesuaian dengan analisa numerik dengan metode ambang batas kesetimbangan yaitu nilai kritis faktor keamanan turun setelah dilakukan penggalian. Nilai kritis deformasi total mengalami peningkatan dari lereng alami sebesar 1,5E-03 m menjadi 7E-02 m atau 7 cm.

Tabel 6. Data input parameter pada analisis kesetimbangan batas

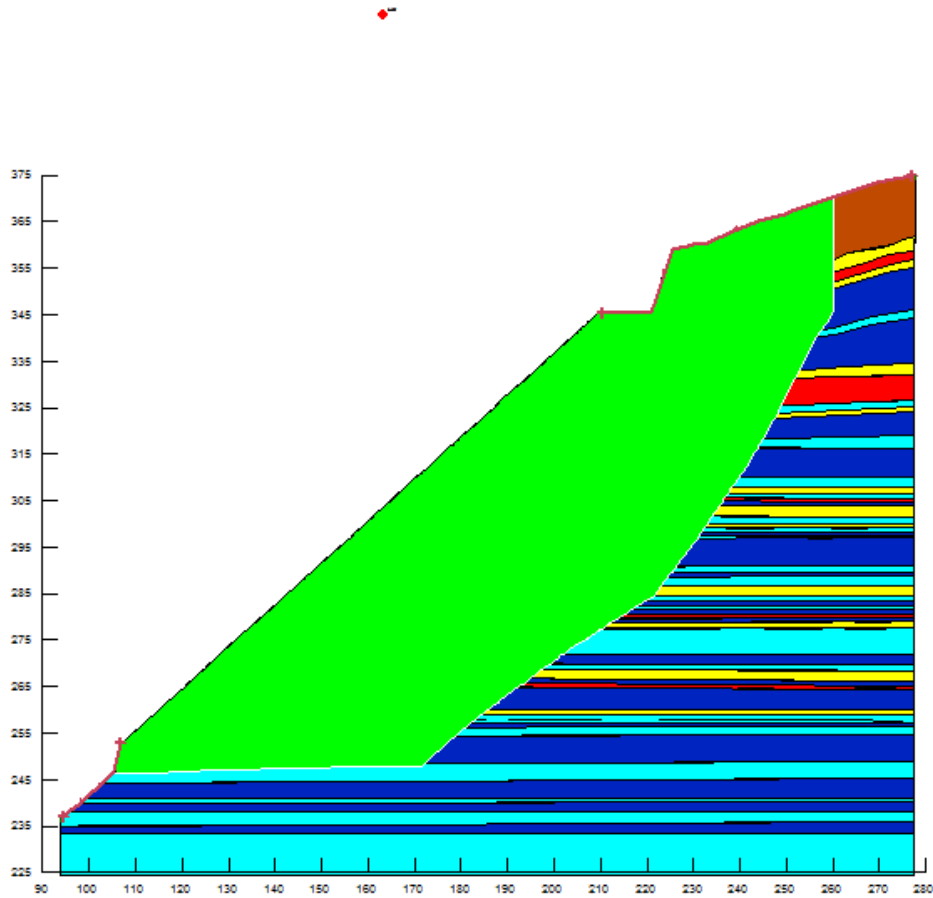
Lokasi	Litologi	Kualitas Massa Batuan	GSI	Lereng keseluruhan	Berat Jenis (MN/m ³)	Kohesi (MPa)	Sudut gesek (°)
Inlet terowong pengelak	Breksi Andesit	Sangat Baik	81	60	0,026	3,09	56,99
		Baik	62	60	0,026	0,732	42,85
		Sedang	52	60	0,025	0,169	17,1
		Buruk	37	60	0,021	0,106	14,3

Tabel 7. Data input parameter pada analisis elemen hingga

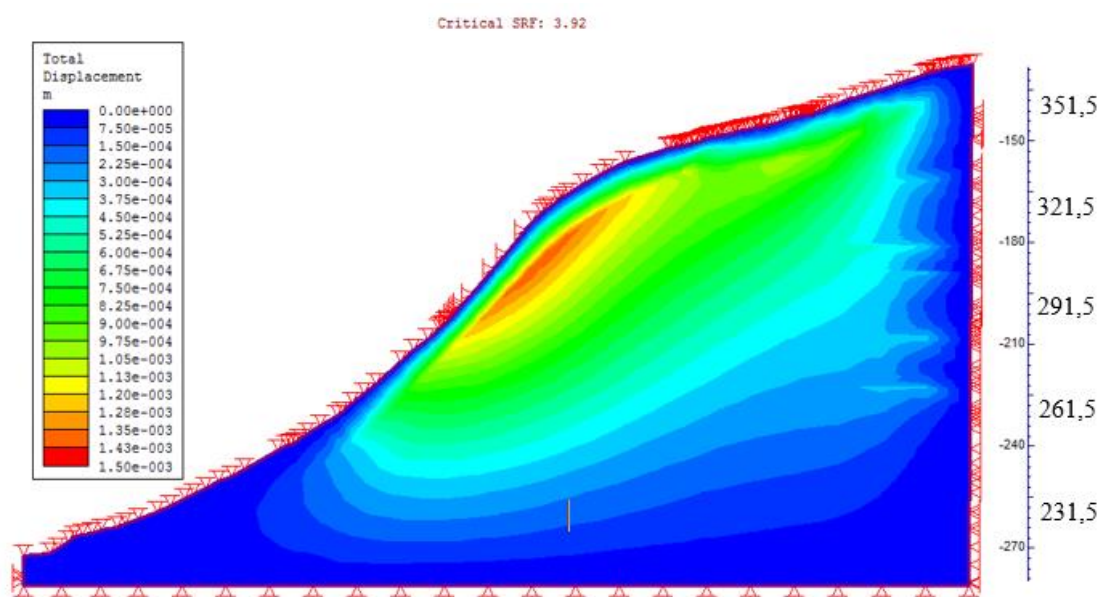
Lokasi	Litologi	Kualitas Massa Batuan	Berat jenis (MN/m ³)	UCS (MPa)	GSI	Modulus Young Intact Rock (MPa)	Poisson Ratio	mb	s	a
Inlet terowong pengelak	Breksi Andesit	Sangat Baik	0,026	96	81	17455	0,2641	5,07	0,12	0,5
		Baik	0,026	27,6	62	17259	0,2641	2,57	0,014	0,5
		Sedang	0,025	1,17	52	13919	0,3	1,8	0,004	0,5
		Buruk	0,021	0,85	37	10787	0,27	1,05	0,0009	0,51



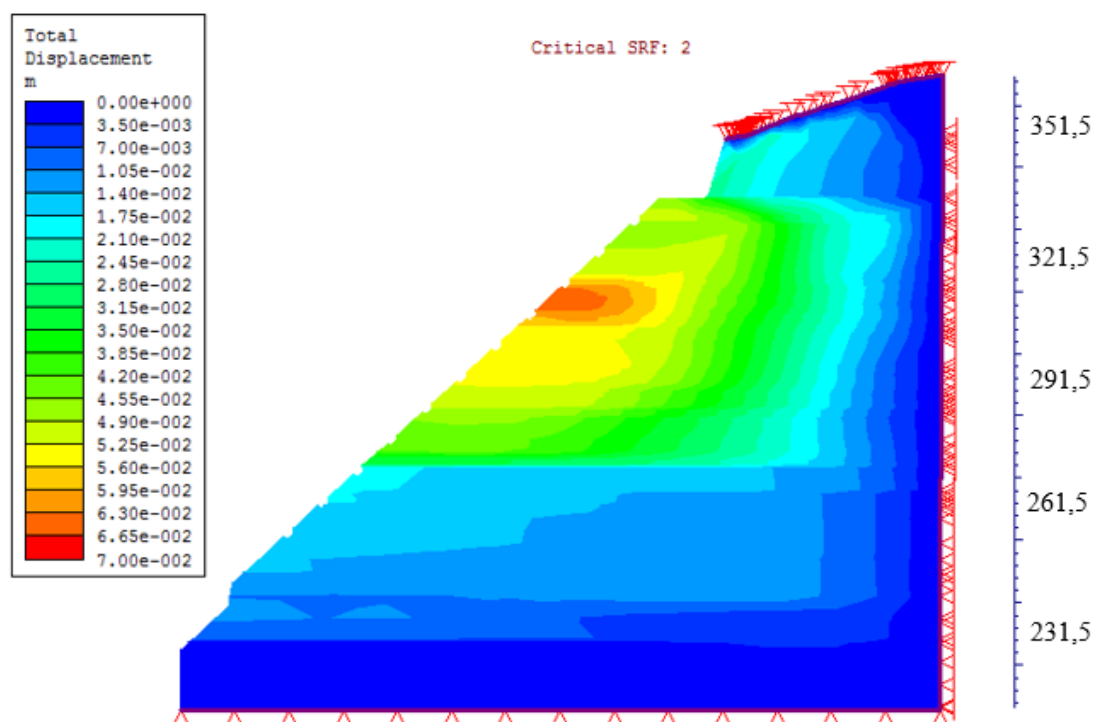
Gambar 3. Hasil analisis ambang batas kesetimbangan lereng alami bukit sandaran intake (nilai faktor keamanan 4,971)



Gambar 4. Hasil analisis ambang batas kesetimbangan desain lereng galian *intake* (nilai faktor keamanan 2,169)



Gambar 5. Hasil analisis elemen hingga lereng alami bukit sandaran *intake* (nilai faktor keamanan 3,92)



Gambar 6. Hasil analisis elemen hingga desain lereng galian intake (nilai faktor keamanan 2)

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis metode kesetimbangan batas dan elemen hingga maka dapat disimpulkan bahwa kondisi lereng alami dan lereng desain galian intake berada dalam kondisi yang aman ($FK > 1,5$). Hasil analisis dengan pemodelan metode ambang batas kesetimbangan dan metode elemen hingga selaras, terjadi penurunan nilai kritis angka keamanan setelah lereng alami dilakukan penggalian pondasi sandaran intake.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PPK Perencanaan Pembangunan Bendungan Bener BBWS Serayu Opak yang telah memberikan izin pengambilan data di lokasi Bendungan Bener. Penulis mengucapkan terima kasih pula kepada tim konsultan supervisi Bendungan Bener PT Virama Karya KSO yang telah menjadi teman diskusi dan di lapangan. Makalah ini merupakan bagian dari thesis penulis yang didukung oleh dana bantuan pendidikan PT Virama Karya.

DAFTAR PUSTAKA

Abramson, L.W., Lee, Sharma S., Boyce, G.M., 2002. *Slope Stability And Stabilization Methods*. Canada: John Wiley & Sons.

Badan Standardisasi Indonesia, 2017. *SNI 8460-2017, Persyaratan Perencanaan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 134-136.

Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. New York: John Wiley & Sons.

Hammah, R.E., Curran, J.H., Yacoub, T., Corkum, B., 2004. Stability Analysis of Rock Slope using the Finite Element Method. Dalam Schubert (red.), *Eurock 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium*.

Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. [Conference presentation] *The 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco*.

Rahardjo, W., Sukandarrumidi, Rosidi, H.M.D, 1995. *Peta Geologi lembar Yogyakarta, skala 1:100.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Romana M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slope. *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in*

*Excavations for Mining and Civil Works
International Society of Rock Mechanics:
Zacatecas. Hal.49-53*

Sasangka, D.J., Taufik, R., Indrawan, I.G.B,
2019. Engineering Geology Investigation for
Slope Geometry Design of Diversion Tunnel
Portal in Bener Dam Purworejo. *Proceeding
of SLOPE 2019*, 1-8.

Singh, B. dan Goel, R.K, 2011. *Engineering Rock
Mass Classification: Tunnelling, Foundation
and Landslide*. Amerika Serikat: Butterworth-
Heinemann.