

**KARAKTERISASI MASSA BATUAN DAN EVALUASI KESTABILAN
LERENG DENGAN METODE NUMERIK PADA RUAS JALAN
PLANJAN–BARON–TEPUS
(ROCK MASS CHARACTERIZATION AND SLOPE STABILITY
EVALUATION USING NUMERICAL METHODS
ON PLANJAN–BARON–TEPUS)**

T P Astuti¹⁾, I G B Indrawan²⁾, D H Barianto³⁾

¹⁾Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

^{2),3)} Universitas Gadjah Mada

¹⁾Jl. Pattimura No. 20, Selong, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan, 12110

^{2),3)}Jl. Grafika No. 2, Sendowo, Sinduadi, Mlati, Sleman, D.I. Yogyakarta, 55281

e-mail: ¹⁾3pujiastuti@pu.go.id, ²⁾igbindrawan@ugm.ac.id, ³⁾didit_geologi@ugm.ac.id

Diterima: 07 September 2022 ; direvisi: 25 Desember 2022; diterbitkan online: 30 Desember 2022.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng dengan mempertimbangkan karakterisasi massa batuan. Lokasi penelitian terletak pada ruas Planjan–Baron–Tepus pada STA 7+000 sampai STA 9+725 dengan litologi yang mendominasi adalah batugamping. Metode pengambilan data diawali dengan penentuan kualitas massa batuan berdasarkan klasifikasi massa batuan dengan metode Geological Strength Index (GSI) batugamping yang diperkenalkan Marinos (2010). Hasil pengujian sifat fisik dan mekanik batuan, serta kualitas massa batuan akan dijadikan parameter input dalam analisis kestabilan lereng. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas massa batuan lokasi penelitian bervariasi mulai dari kondisi baik (good) pada STA 9+075, kualitas massa batuan sedang (fair) pada STA 7+825, hingga kualitas massa batuan buruk (poor) pada STA 8+475. Berdasarkan analisis kestabilan lereng dengan metode elemen hingga dan kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown didapatkan hasil bahwa lereng pada tiga lokasi yang mewakili kualitas massa batuan berada dalam kondisi stabil (aman) pada kondisi tanpa beban gempa dan kondisi dengan beban gempa.

Kata Kunci: kestabilan lereng, kualitas massa batuan, geological strength index, batugamping, metode elemen hingga.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the stability of the slope by considering the rock mass characterization. The research location was conducted on the Planjan–Baron–Tepus section at STA 7+000 to STA 9+725, with limestones dominating the lithology. The data collection method begins with determining rock mass quality based on rock mass classification using the Geological Strength Index (GSI) of limestone introduced by Marinos (2010). The results of testing the physical and mechanical properties of rocks and the quality of rock mass will be used as input parameters in the slope stability analysis. The results showed that the rock mass quality in the research area varied from "good" condition at STA 9+075, "fair" condition at STA 7+825, to "poor" condition at STA 8+475. Based on the slope stability analysis using the finite element method and the Generalized Hoek-Brown failure criteria, the result of the slope analysis at three locations representing the rock mass quality was a stable (safe) condition without seismic loads and with seismic loads.

Key words: slope stability, rock mass quality, geological strength index, limestone, finite element method.

PENDAHULUAN

Pelaksanaan pembangunan jalan ruas Planjan–Baron–Tepus terletak di wilayah selatan Jawa, dimana topografi yang mendominasi adalah perbukitan yang bergelombang dengan kemiringan agak curam hingga curam. Salah satu tantangan yang dihadapi dalam pelaksanaan konstruksi ini adalah pekerjaan ekskavasi yang memotong daerah perbukitan. Berfokus pada upayaantisipasi risiko geologi negatif yang berpotensi mengganggu keselamatan, kerusakan lingkungan hingga terputus konektivitas, perlu dilakukan analisis kestabilan lereng.

Analisis kestabilan lereng diperlukan untuk menentukan bidang gelincir yang mungkin terjadi, menilai batas keamanan lereng, menentukan zona rawan longsor, serta memastikan batas kestabilan lereng saat terjadi perubahan tegangan akibat beban kerja selama periode konstruksi. Parameter yang digunakan oleh Satuan Kerja Pelaksanaan dan Pengawasan Jalan Nasional Provinsi D.I. Yogyakarta dalam perancangan desain lereng didasarkan pada hasil pengujian bor inti pada beberapa lokasi. Menurut banyak penelitian, kestabilan lereng batuan dipengaruhi oleh faktor eksternal yang terkait dengan morfologi dan sifat massa batuan, serta karakteristik diskontinuitas yang mempengaruhi (Saadoun, Hafsouli and Fredj 2018). Selama periode konstruksi, banyak pergerakan yang dihasilkan akibat proses ekskavasi batuan. Pergerakan relatif tersebut dapat merambat pada bidang diskontinuitas dan menciptakan rekahan pada matriks batuan, sehingga dapat berpengaruh pada nilai margin kestabilan lereng desain (Saadoun et al. 2018). Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi kestabilan lereng batuan dengan mempertimbangkan karakteristik massa batuan.

Salah satu metode numerik yang dapat digunakan dalam analisis kestabilan lereng adalah metode elemen hingga. Pendekatan yang digunakan dalam metode elemen hingga adalah dengan melakukan pengurangan secara bertahap atau mereduksi kekuatan geser material hingga menghasilkan mekanisme keruntuhan pada lereng. Penilaian kestabilan lereng dengan pemodelan numerik merupakan bagian yang penting dalam merumuskan

desain lereng batuan yang aman (Pradhan and Siddique 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan lereng batuan dengan memperhitungkan faktor karakterisasi massa batuan menggunakan pemodelan numerik, dan membandingkan hasil analisis dengan desain lereng.

HIPOTESIS

Karakterisasi massa batuan pada lokasi penelitian tersusun dari batugamping dengan kualitas massa batuan yang bervariasi mulai dari kualitas baik (*good*) hingga kualitas buruk (*poor*), namun dengan penanganan yang baik dapat memenuhi dampak nilai faktor keamanan kestabilan lereng.

METODOLOGI

Lokasi penelitian berada di ruas Pembangunan Jalan Planjan–Baron–Tepus STA 7+000 sampai dengan STA 9+725, Kabupaten Gunung Kidul Provinsi D.I. Yogyakarta. Secara koordinat terletak pada 110°36'18,5" BT dan 8°07'48" LS sampai dengan 110°37'10" BT dan 8°08'50" LS, seperti pada Gambar 1. Lereng yang dijadikan sampel lokasi adalah lereng yang mewakili setiap kelas dalam kualitas massa batuan, yaitu pada STA 7+825, STA 8+475 dan STA 9+075.

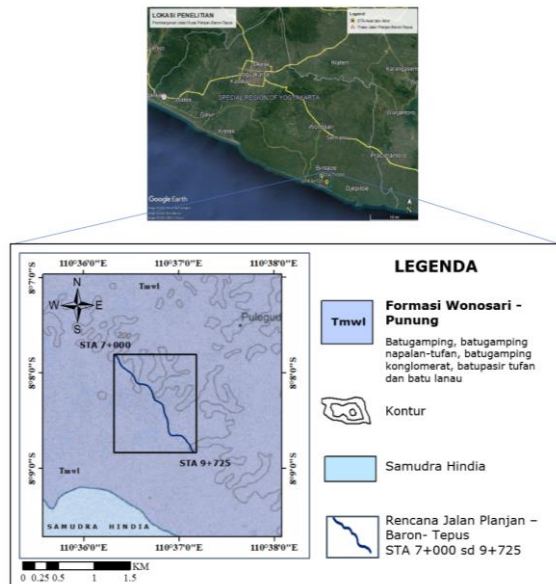
Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan kriteria keruntuhan batuan *Generalized Hoek-Brown*. Penyusunan parameter untuk analisis kestabilan lereng diperoleh dari data pengamatan langsung di lapangan dan pengujian laboratorium. Pengamatan langsung di lapangan dilakukan untuk memperoleh nilai GSI. Pengujian laboratorium dilakukan untuk mendapatkan parameter nilai kuat tekan batuan, berat jenis batuan, *poisson's ratio*, dan *Young's modulus*. Data yang tidak diperoleh secara langsung dari pengujian menggunakan data empiris.

HASIL DAN ANALISIS

Geologi Area Penelitian

Morfologi lokasi penelitian berada pada satuan karst agak curam (8°-16°) hingga satuan karst curam (24°-33°). Satuan karst

dicirikan oleh kenampakan perbukitan batugamping, lembah kering, tinggi akan porositas dan permeabilitas, hingga sulit ditemukan air sungai di permukaan. Berdasarkan Peta Geologi Lembar Surakarta–Girintontro oleh Surono dan Sudarno (1992), formasi pada lokasi penelitian berada pada formasi Wonosari–Punung (Tmw1) dengan litologi yang mendominasi daerah adalah batugamping, seperti pada Gambar 1.



Sumber: Surono dan Sudarno (1992), Google earth (2022)

Gambar 1. Lokasi penelitian dan sebagian peta geologi lembar Surakarta–Girintontro ditampilkan dengan trase jalan area penelitian

Geological Strength Index (GSI)

Hampir semua studi kestabilan lereng batuan ditentukan dengan menentukan kondisi diskontinuitas dari pemetaan singkapan (Wyllie 2018). Kondisi diskontinuitas ini dapat menggambarkan kualitas dari suatu massa batuan. Salah satu metode yang digunakan dalam menentukan kualitas massa batuan di lapangan adalah metode *Geological Strength Index* (GSI). GSI merupakan sistem klasifikasi untuk memperkirakan pengurangan kekuatan massa batuan yang didasarkan pada perbedaan kondisi geologi berdasarkan derajat rekahan (*interlocking of rock pieces*) dan kondisi permukaan rekahan (*surface quality*), dimana yang menjadi parameter perbedaan adalah struktur dari sifat blok, dan kondisi permukaan berupa kekasaran, pelapukan atau

alterasi, dan pengisi. Pelapukan yang terjadi pada massa batuan akan membentuk zona pelapukan batuan yang dapat menjadi bidang perlemahan dan berpengaruh terhadap kekuatan massa batuan. Karakteristik massa batuan dalam penelitian ini menggunakan klasifikasi GSI batugamping (Marinos 2010). Menurut Sun et al. (2022), diskontinuitas memainkan peran kunci dalam kestabilan lereng batuan. Karakteristik geometrik dan kekuatan dari diskontinuitas membuat perbedaan yang jelas. Oleh karena itu, representasi yang tepat dari berbagai jenis diskontinuitas diperlukan untuk memastikan bahwa kestabilan lereng batuan mewakili kondisi riil.

Nilai GSI batuan bawah permukaan didapatkan dari penentuan kondisi kekar mengacu pada klasifikasi penilaian *Joint Condition* ($Jcond_{89}$) yang ditentukan oleh Bieniawski (1989) dan nilai *Rock Quality Designation* (RQD). Hoek, Carter, Diederichs (2013) memformulasikan hubungan $Jcond_{89}$ dan RQD untuk mendapatkan nilai GSI bawah permukaan seperti persamaan di bawah ini.

$$1,5Jcond_{89} + 0,5 RQD \dots \dots \dots (1)$$

keterangan:

- GSI : nilai *Geological Strength Index*
- $Jcond_{89}$: parameter kondisi kekar dengan atau tanpa *infilling* berdasarkan kriteria RMR_{89}
- RQD : *Rock Quality Designation*

Berdasarkan nilai GSI yang didapat dari perhitungan berbagai parameter penting, meliputi peringkat struktur dan kondisi permukaan diskontinuitas, massa batuan kemudian diklasifikasikan menjadi lima kelas utama berdasarkan klasifikasi mengikuti Sivakugan, Shukla and Das (2013), seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Penggunaan GSI dalam penentuan kualitas massa batuan digunakan pada kondisi batuan tanpa kecenderungan keruntuhan kinematik atau kondisi batuan isotropik, sehingga nilai GSI dapat digunakan langsung sebagai parameter kekuatan massa batuan pada kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan menggunakan Persamaan (2). Hasil nilai GSI, kuat tekan uniaksial, faktor gangguan, dan konstanta m_i (Tabel 2) digunakan untuk mendapatkan konstanta m_b , s , dan a seperti ditunjukkan pada persamaan (3), (4), dan (5).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} + s \right]^a \quad (2)$$

$$m_b = m_i \exp \left[\frac{GSI-100}{28-14D} \right] \quad (3)$$

$$s = \exp \left[\frac{GSI-100}{9-3D} \right] \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \left[e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right] \quad (5)$$

keterangan:

σ_1' : tegangan efektif maksimum (kN/m²)

σ_3' : tegangan efektif minimum (kN/m²)

σ_{ci} : nilai kuat tekan uniaksial (kN/m²)

m_b : konstanta massa batuan *Generalized Hoek-Brown* terkait kekuatan friksi antar blok batuan pada massa batuan dan kekuatan intrinsik pada batuan utuh

s dan a : nilai konstanta material, dimana $s=1$ jika batuan utuh

GSI : nilai *Geological Strength Index*

D : faktor gangguan akibat proses pengalihan

Tabel 1. Kualitas GSI massa batuan

Kualitas Massa Batuan	Nilai GSI
Sangat baik (<i>Very good</i>)	76-95
Baik (<i>Good</i>)	56-75
Sedang (<i>Fair</i>)	41-55
Buruk (<i>Poor</i>)	21-40
Sangat buruk (<i>Very poor</i>)	<21

Sumber: Sivakugan dkk. (2013)

Tabel 2. Konstanta nilai m_i untuk batuan sedimen non klastik

Jenis batuan	Konstanta m_i
Batugamping Kristalin	12±3
Batugamping Sparit	10±2
Batugamping Mikrit	9±2
Dolomite	9±3

Sumber : Marinos dan Hoek (2000)

Karakterisasi Massa Batuan Bawah Permukaan (GSI Bawah Permukaan)

Penilaian karakteritik massa batuan bawah permukaan didapatkan dari pengamatan hasil bor inti pada BH-04 dan BH-05 seperti pada Gambar 2, untuk kemudian dilakukan pengukuran nilai RQD (Deere and Miller 1966) dan penilaian terhadap J_{cond89} (Bieniawski 1989) seperti

rumusan pada Persamaan 1. Nilai J_{cond89} dan RQD ini dapat diamati secara langsung dari sampel bor inti untuk kemudian diambil nilai modulus dari masing-masing parameter, sehingga didapatkan nilai GSI seperti pada Tabel 3.



a) BH-04 kedalaman 10 m - 15 m



b) BH-05 kedalaman 20 m - 25 m

Sumber: Satker P2JN Provinsi D.I. Yogyakarta (2020)

Gambar 2. Pengamatan GSI bawah permukaan

Tabel 3. Nilai GSI bawah permukaan

Bor Inti	BH-04	BH-05
Nilai Modus RQD	34	0
Nilai Modus J_{cond89}	25	25
Nilai GSI (Persamaan 1)	55	38
Kualitas massa batuan	Sedang (<i>fair</i>)	Buruk (<i>poor</i>)

Sumber: data sekunder yang diolah (2022)

Karakterisasi Massa Batuan Permukaan (GSI Permukaan)

Nilai GSI didapatkan dari pengamatan langsung pada singkapan lereng dengan melakukan penilaian terhadap kondisi struktur dan komposisi batuan, serta kondisi permukaan bidang diskontinuitas termasuk tingkat kekasaran dan pelapukan. Pada singkapan lereng STA 7+825, litologi yang menyusun lereng adalah batugamping sparit dengan struktur dan komposisi yang saling bertautan dengan baik dibentuk oleh

diskontinuitas yang berpotongan (tipe A), permukaan batuan mengalami tingkat pelapukan ringan dicirikan dengan terjadinya perubahan warna segar batuan dari putih menjadi abu-abu. Nilai GSI singkapan berdasarkan klasifikasi GSI batugamping (Marinos 2010) berada pada rentang 55-75. Pada singkapan lereng STA 8+475, kenampakan blok struktur dengan set diskontinuitas lebih dari empat (tipe D) mendominasi singkapan lereng STA 8+475, permukaan singkapan mengalami lapuk tinggi dengan lebih dari setengah material batuan terdisintegrasikan menjadi tanah. Singkapan berada pada rentang nilai GSI 30-40. Pada singkapan lereng STA 9+075, kondisi struktur dan komposisi saling bertautan dan massa batuan yang saling mengunci dengan baik (tipe A), tingkat pelapukan rendah dengan rentang nilai GSI sebesar 55-75. Kenampakan singkapan dapat dilihat pada Gambar 3 sampai Gambar 5 dan hasil *plotting* nilai GSI permukaan dapat dilihat pada Gambar 6.



Sumber: pengamatan langsung (2022)

Gambar 4. Singkapan lereng STA 8+475 (kamera menghadap barat daya)



Sumber: pengamatan langsung (2022)

Gambar 3. Singkapan lereng STA 7+825 (kamera menghadap utara)



Sumber: pengamatan langsung (2022)

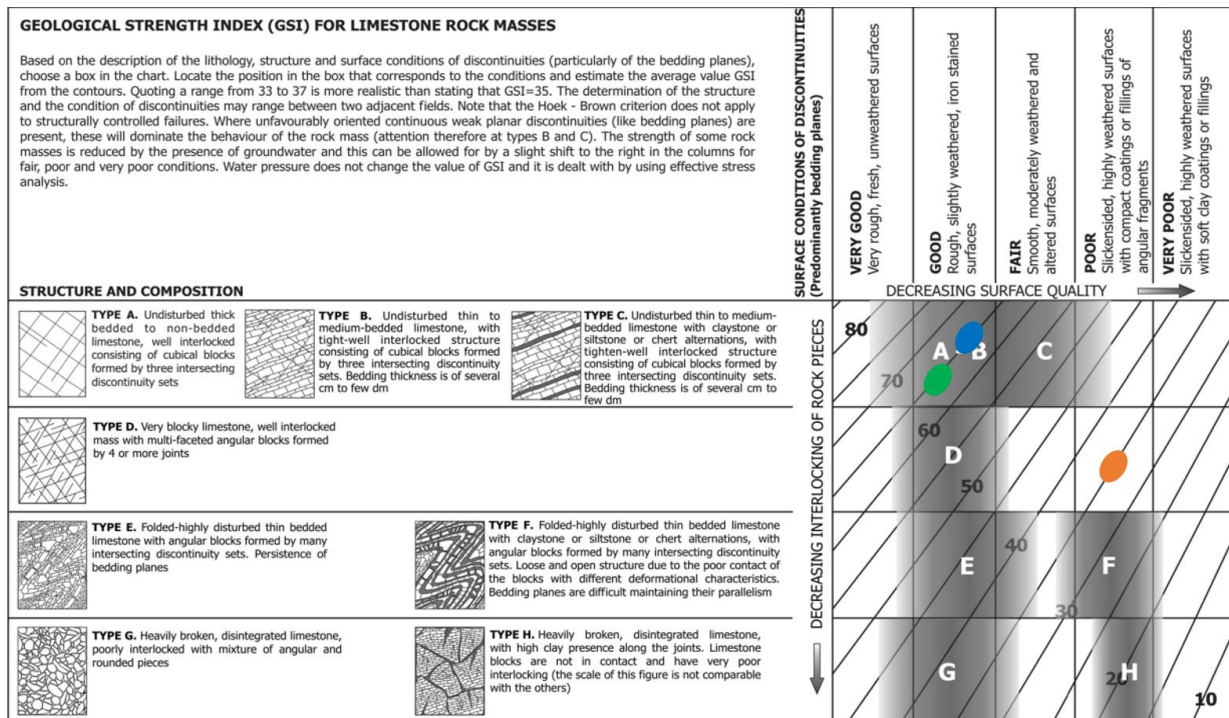
Gambar 5. Singkapan lereng STA 9+075 (kamera menghadap timur laut)

Lokasi lereng yang tidak mempunyai parameter nilai GSI bawah permukaan, nilai GSI yang digunakan sebagai parameter input dalam analisis kestabilan lereng adalah nilai tengah dari rentang nilai GSI, sedangkan untuk lokasi lereng yang mempunyai nilai parameter GSI bawah permukaan maka nilai GSI yang digunakan adalah nilai terendah, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai GSI lokasi penelitian

Uraian	7+825	8+475	9+075
GSI bawah permukaan	55	38	-
GSI permukaan	55-75	30-40	55-75
GSI yang digunakan dalam analisis	55	35	65

Sumber: hasil analisis (2022)



Keterangan:

● STA 7+825 ● STA 8+475 ● STA 9+075

Sumber: Marinos (2010)

Gambar 6. Plotting nilai kualitas massa batuan (GSI) permukaan

Geodinamik

Untuk parameter pembebanan, selain beban mati, beban tambahan, dan beban lalu lintas, pemodelan kestabilan lereng harus mempertimbangkan beban gempa. Beban gempa merupakan salah satu faktor pertimbangan yang perlu diperhitungkan dalam perancangan bangunan sipil di Indonesia (BSN 2017). Pelepasan energi yang berasal dari beban gempa mengakibatkan percepatan gelombang seismik menuju permukaan tanah. Percepatan gelombang tersebut mengakibatkan gaya inersia pada lereng dan dapat mengakibatkan ketidakstabilan atau deformasi. Beban gempa diasumsikan sebagai *body force* yang bekerja pada setiap elemen massa lereng sebesar massa lereng dikalikan dengan koefisien seismik.

Koefisien percepatan puncak (A_s) didapatkan dari hubungan nilai percepatan puncak di permukaan (PGA) dan faktor amplifikasi getaran percepatan pada batuan dasar (F_{PGA}) seperti pada Persamaan 6. Besaran koefisien seismik horizontal (kh) yaitu setengah dari percepatan puncak horizontal yang ditentukan dari kelas situs dan faktor amplifikasi seperti pada Persamaan 7.

$$A_s = PGA \times F_{PGA} \dots \dots \dots (6)$$

$$kh = 0,5 \times A_s \dots \dots \dots (7)$$

keterangan:

- A_s : koefisien percepatan puncak
- PGA : nilai percepatan puncak di permukaan
- F_{PGA} : faktor amplifikasi getaran percepatan pada batuan dasar
- kh : koefisien seismik horizontal

Berdasarkan SNI 8460 (BSN 2017), nilai rata-rata tahanan penetrasi standar (N_{SPT}) bor inti merupakan salah satu metode yang

digunakan dalam menentukan parameter kelas situs. Parameter kelas situs dibagi menjadi enam klasifikasi (Tabel 5), dan nilai faktor amplifikasi getaran percepatan pada batuan dasar seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5. Klasifikasi kelas situs dalam SNI 8460

lasifikasi kelas situs	Nilai rata-rata tahanan penetrasi standar lapangan
keras (SA)	N/A
dasar (SB)	N/A
lunak (SC)	>50
sedang (SD)	15-20
lunak (SE)	<15
khusus (SF)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik: <ul style="list-style-type: none"> ● Rawan dan berpotensi runtuh akibat beban gempa seperti rawan likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah. ● Lempung sangat organik dan/atau gambut dengan ketebalan lebih dari 3 meter. ● Lempung berplastisitas tinggi dengan ketebalan lebih dari 7,5 meter dan Indeks Plastisitas lebih dari 75. ● Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan lebih dari 35 meter dengan nilai rata-rata kuat geser niralir lapisan kurang dari 50 kPa.

Sumber : BSN (2017)

Tabel 6. Nilai faktor amplifikasi getaran percepatan pada batuan dasar (F_{PGA}) dalam SNI 8460

Kelas situs	$PGA \leq 0,1$	$GA = 0,2$	$GA = 0,3$	$GA = 0,4$	$GA \geq 0,5$
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan dasar (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Batuan lunak (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber : BSN (2017)

Tabel 7. Nilai koefisien seismik

Bor Inti	BH-04	BH-05
N_{SPT}	>60	>60
Kelas Situs	SC	SC
PGA	0,40	0,40
F_{PGA}	0,10	0,10
Koefisien seismik (As)	0,40	0,40
Koefisien seismik horizontal (kh)	0,20	0,20

Sumber : data sekunder yang diolah (2022)

Berdasarkan Peta Sumber Bahaya Gempa Indonesia, besaran nilai percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk perancangan lereng pada lokasi penelitian yaitu sebesar 0,3 g - 0,4 g. (PUSGEN 2017). Dalam analisis akan digunakan nilai PGA tertinggi yaitu 0,4 g. Penentuan kelas situs didapatkan dari nilai rata-rata tahanan penetrasi standar (N_{SPT}) bor inti yaitu di lokasi BH-04 dan BH-05. Berdasarkan data pengeboran inti (Tabel 7), kelas situs pada lokasi penelitian berada pada kelas situs batuan lunak (SC) dengan besaran faktor amplifikasi

1,0. Nilai koefisien seismik horizontal (kh) yang didapatkan melalui Persamaan 6 dan Persamaan 7 sebesar 0,20 g.

Metode Elemen Hingga

Metode numerik telah berhasil diterapkan pada analisis kestabilan lereng dan menjadi salah satu alternatif terbaik dibandingkan metode kesetimbangan batas tradisional, karena memungkinkan untuk menganalisis masalah kompleks dengan menggunakan lebih sedikit asumsi (Hammah dkk. 2009). Salah satu metode numerik yang digunakan untuk analisis kestabilan lereng adalah metode elemen hingga. Abramson et al. (2005) menjelaskan bahwa prinsip dasar metode elemen hingga adalah mendiskritisasi massa lereng menjadi elemen-elemen yang lebih kecil sampai dengan jumlah hingga (*finite*), dimana elemen tersebut saling berhubungan pada simpul (*nodes*) dan pada batas-batas kontinum yang telah ditentukan. Setiap simpul (*nodes*) akan mengalami pergerakan sehingga menyebabkan perpindahan

dari setiap simpul (*nodes*) tersebut. Perpindahan ini akan dianalisis dan dihitung dengan menggunakan prosedur iterasi reduksi yang dipengaruhi oleh beberapa faktor atau yang dikenal dengan istilah pendekatan metode *Shear Strength Reduction* (SSR). SSR merupakan metode pengurangan kekuatan geser material dengan faktor reduksi kekuatan geser atau *Safety Reduction Factor* (SRF). Menurut Kainthola et al. (2012), dalam perhitungan analisis prosedur SRF lebih disukai karena terus menurunkan nilai parameter kekuatan geser sampai material menunjukkan tanda-tanda kegagalan. Besaran nilai SRF kritis menggambarkan besaran nilai faktor keamanan lereng. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data yang diperoleh dari hasil pengamatan terhadap singkapan batuan di lapangan, data bor inti, dan hasil pengujian laboratorium. Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengetahui karakteristik material yang ada di lokasi penelitian. Jenis pengujian laboratorium yang dilakukan yaitu uji sifat fisis batuan dan uji kuat tekan uniaksial. Dalam penelitian ini, kestabilan lereng dianalisis dengan menggunakan karakteristik massa batuan, sifat-sifat material sebagai parameter input yang disatukan dalam pemodelan geoteknik dengan menggunakan metode elemen hingga, kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown*, tipe pemodelan yaitu *plane strain*, tipe elemen diskrit adalah *6-nodes triangles* dengan pola *uniform* dan analisis pengaruh beban gempa terhadap kestabilan lereng dilakukan dengan analisis *pseudostatic*. Tiga lokasi lereng dipilih untuk dilakukan analisis kestabilan lereng dengan membandingkan dua kondisi

pembebanan, yaitu kondisi tanpa beban gempa dan kondisi dengan beban gempa.

Evaluasi Kestabilan Lereng dengan Metode Elemen Hingga

Geometrik lereng yang digunakan dalam analisis ini berdasarkan data dari Satuan Kerja P2JN Provinsi D.I. Yogyakarta. Ketinggian lereng STA 7+825 adalah 8 meter dengan perbandingan kemiringan *bench* sebesar 1H:1,5V. Untuk lereng STA 8+475 ketinggian lereng adalah 40 meter dengan perbandingan kemiringan *bench* sebesar 1H:2V. Ketinggian lereng STA 9+075 adalah 28 meter dengan perbandingan kemiringan *bench* sebesar 1H:2V. Lereng yang ditinjau selebar *right of way* jalan. Dari data bor inti dan pengamatan langsung di lapangan, muka air tanah berada pada kondisi yang dalam (>36 m).

Tabel 8. Nilai pembebanan

Pembebanan	Nilai
Beban tambahan (MN/m ²)	0,010
Beban lalu lintas (MN/m ²)	0,015
Beban gempa	0,20

Sumber : data sekunder (2022)

Pembebanan yang digunakan dalam analisis seperti pada Tabel 8. Sifat-sifat material yang digunakan dalam analisis seperti ditunjukkan pada Tabel 9. Sifat fisik dan mekanik didapatkan dari hasil pengujian laboratorium, sedangkan parameter *Generalized Hoek Brown* didapatkan dari data empiris seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3 sampai Persamaan 5.

Tabel 9. Sifat-sifat material dalam analisis kestabilan lereng dengan metode elemen hingga

Parameter Input	Satuan	STA 7+825	STA 8+475	STA 9+075
Berat isi ¹⁾	MN/m ³	0,0213	0,0185	0,0228
Kuat tekan uniaksial ¹⁾	MPa	17,71	8,91	28,97
<i>Poisson's ratio</i> ¹⁾	MPa	0,11	0,17	0,18
Modulus elastisitas ¹⁾	MPa	1.480,15	8.060,50	2.858,01
Tipe material		<i>Plastic</i>	<i>Plastic</i>	<i>Plastic</i>
Nilai GSI ²⁾	tanpa satuan	55	35	65
Parameter m_i ²⁾	tanpa satuan	10	10	10
Parameter m_b ²⁾	tanpa satuan	2,005	0,981	2,865
Parameter s ²⁾	tanpa satuan	0,007	0,001	0,020
Parameter a ²⁾	tanpa satuan	0,504	0,516	0,502
Faktor pengganggu, D ²⁾	tanpa satuan	0	0	0

Sumber: ¹⁾ data primer (2022), ²⁾ data empiris (2022)

Hasil Analisis Kestabilan Lereng

Berdasarkan penilaian GSI seperti pada Tabel 6 dan klasifikasi kualitas massa batuan oleh Sivakugan dkk. (2013), seperti pada Tabel 1, lereng di lokasi penelitian mempunyai massa batuan dengan kualitas buruk (*poor*) pada STA 8+475, kualitas sedang (*fair*) pada STA 7+825, hingga kualitas baik (*good*) pada STA 9+075. Hasil analisis kestabilan lereng dengan pemodelan metode elemen hingga yang diperoleh yaitu nilai SRF kritis (*critical SRF*) yang menunjukkan nilai faktor keamanan lereng, regangan geser maksimum (*maximum shear strain*) yang menunjukkan pola keruntuhan (*slip surface*), dan nilai pergerakan lereng terbesar (*total displacement*).

Hasil analisis kestabilan lereng untuk kualitas massa batuan buruk (*poor*), sedang (*fair*), hingga baik (*good*) menunjukkan kondisi lereng lokasi penelitian berada dalam kondisi aman (stabil), baik pada kondisi tanpa beban gempa dan dengan beban gempa. Rekapitulasi analisis kestabilan lereng dapat dilihat pada Tabel 10. Pemilihan tipe material yang digunakan dalam analisis ini adalah analisis plastis, dimana pada proses perhitungan penurunan (*displacement*) tidak ditentukan interval waktu tertentu dan beban disimulasikan akan langsung bekerja. Berdasarkan SNI 8460, selain melalui pendekatan nilai faktor keamanan, analisis kestabilan lereng dapat juga dilakukan dengan menggunakan pendekatan *total displacement* dengan pemodelan numerik (BSN 2017). Semakin besar nilai *total displacement* maka semakin tidak stabil massa batuan tersebut (Sariandi et al. 2018). Menurut Hyness-Griffin dkk. (1984) dalam Duncan dkk.

(2014), batas izin maksimal pergerakan pada lereng batuan adalah sebesar 1 meter. Dari Tabel 10 dapat dilihat bahwa besaran nilai *total displacement* pada kondisi tanpa beban gempa dan pada kondisi dengan beban gempa masih di bawah batas izin, sehingga dapat dikatakan lereng masih dalam kondisi stabil (aman).

PEMBAHASAN

Analisis Kestabilan Lereng STA 7+825

Hasil analisis kestabilan lereng STA 7+825 dengan kualitas massa batuan sedang (*fair*) berada dalam kondisi stabil (aman). Lereng dimodelkan dengan kemiringan *bench* 1H:1,5V dengan ketinggian setiap *bench* adalah 8 meter. Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng STA 7+825 untuk kondisi tanpa beban gempa menghasilkan nilai SRF kritis sebesar 5,99 sedangkan akibat penambahan beban gempa nilai SRF kritis sebesar 4,52 seperti pada Gambar 7.

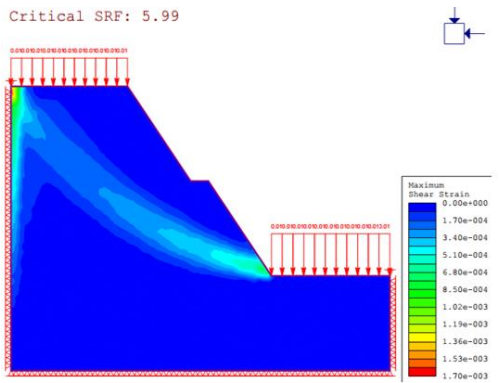
Mekanisme keruntuhan lereng dan lokasi bidang keruntuhan dapat diamati dari nilai *maximum shear strain*. Berdasarkan analisis untuk kondisi tanpa beban gempa dan dengan beban gempa, distribusi kontur *maximum shear strain* ditandai dengan warna biru muda hingga hijau seperti pada Gambar 7.a) dan 7.b). Pola keruntuhan yang dihasilkan pada kondisi tanpa beban gempa memiliki kemiripan dengan pola keruntuhan pada kondisi dengan beban gempa.

Besaran nilai *total displacement* lereng STA 7+825 pada kondisi tanpa beban gempa sebesar 0,003 m dan pada kondisi dengan beban gempa sebesar 0,002 m. Nilai tersebut masih memenuhi batas izin yang disyaratkan yaitu 1 m, dan dapat disimpulkan lereng berada pada kondisi stabil (aman).

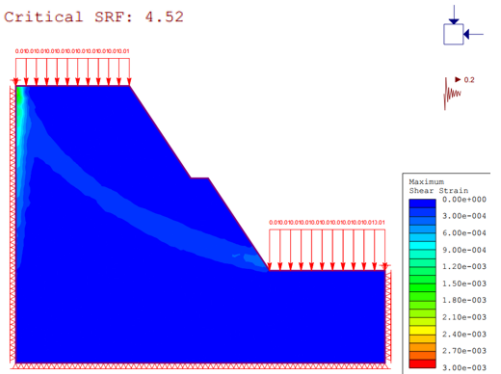
Tabel 10. Nilai *critical SRF* dan *total displacement*

Parameter		STA 7+825	STA 8+475	STA 9+075
Kualitas massa batuan		sedang (<i>fair</i>)	buruk (<i>poor</i>)	baik (<i>good</i>)
<i>Critical SRF</i>				
Kondisi tanpa beban gempa	SRF >1,5	5,99	1,700	8,130
Kondisi dengan beban gempa	SRF >1,1	4,52	1,200	6,460
<i>Total displacement</i>				
Kondisi tanpa beban gempa	Maks. 1 m	0,003	0,002	0,002
Kondisi dengan beban gempa	Maks. 1 m	0,002	0,003	0,003

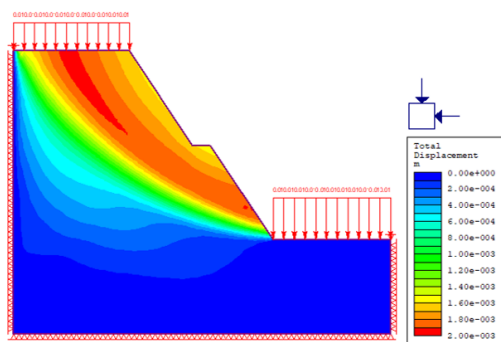
Sumber : hasil analisis (2022)



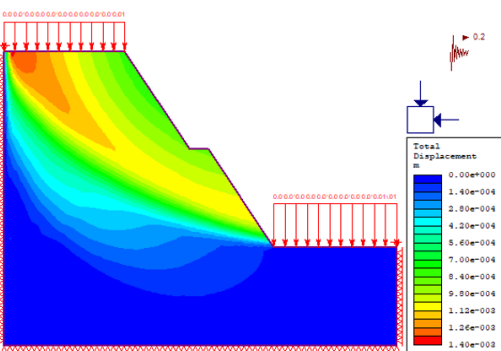
a) Critical SRF dan maximum shear strain lereng STA 7+825 tanpa beban gempa



b) Critical SRF dan maximum shear strain lereng STA 7+825 dengan beban gempa



c) Total displacement lereng 7+825 tanpa beban gempa



d) Total displacement lereng 7+825 dengan beban gempa

Sumber : hasil analisis (2022)

Gambar 7. Hasil analisis kestabilan lereng STA 7+825

Analisis Kestabilan Lereng STA 8+475

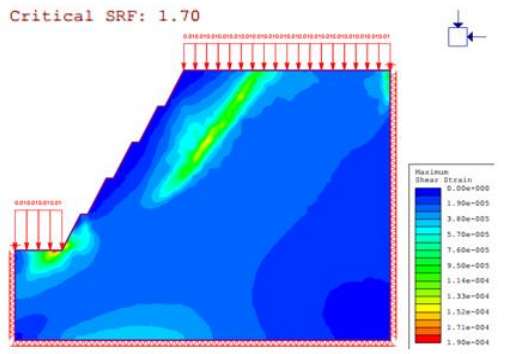
Hasil analisis kestabilan lereng dengan kualitas massa batuan buruk (*poor*) dimodelkan pada lereng STA 8+475. Lereng setinggi 40 meter dimodelkan dalam lima *bench* dengan ketinggian setiap *bench* adalah 8 meter. Perbandingan kemiringan *bench* sebesar 1H:2V. Berdasarkan analisis kestabilan lereng seperti pada Gambar 8, nilai SRF kritis yang dihasilkan pada kondisi tanpa beban gempa sebesar 1,70 dan kondisi dengan beban gempa sebesar 1,20. Nilai SRF kritis yang dihasilkan masih memenuhi persyaratan, sehingga lereng dapat dikatakan dalam kondisi stabil (aman).

Berdasarkan analisis untuk kondisi tanpa beban gempa, distribusi kontur *maximum shear strain* terlihat warna biru hingga jingga dan membentuk pola keruntuhan kritis dari kaki lereng hingga bagian atas lereng seperti ditunjukkan pada Gambar 8.a). Nilai *maximum shear strain* pada bagian kaki lereng yang ditunjukkan dengan warna jingga mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan pada bagian atas lereng. Untuk kondisi dengan beban gempa, distribusi kontur *maximum shear strain* terlihat warna biru hingga jingga dan membentuk pola keruntuhan seperti ditunjukkan pada Gambar 8.b). Nilai *maximum shear strain* pada bagian ujung atas lereng mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan pada kaki lereng.

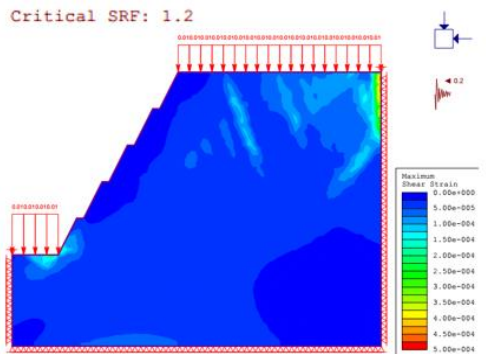
Berdasarkan nilai *total displacement* yang dihasilkan lereng berada pada kondisi stabil. Hal ini dikarenakan besaran nilai pergeseran yang dihasilkan kurang dari 1 m, yaitu sebesar 0,002 m pada kondisi tanpa beban gempa dan pada kondisi dengan beban gempa sebesar 0,003 m.

Analisis Kestabilan Lereng STA 9+075

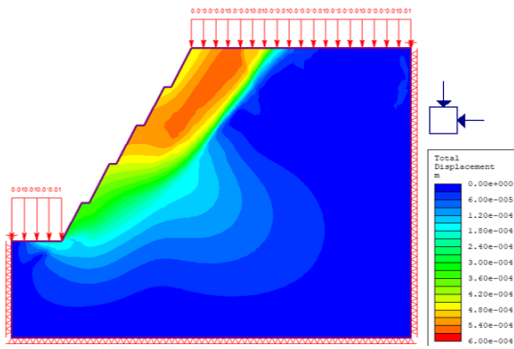
Lereng STA 9+075 dengan kualitas massa batuan baik (*good*) berada dalam kondisi stabil (aman). Lereng didesain terdiri dari tiga *bench* dengan kemiringan *bench* sebesar 1H:2V. Hasil analisis kestabilan lereng STA 9+075 pada kondisi tanpa beban gempa menghasilkan nilai SRF kritis sebesar 8,13 dan sebesar 6,46 pada kondisi dengan beban gempa, seperti pada Gambar 9.a) dan 9.b).



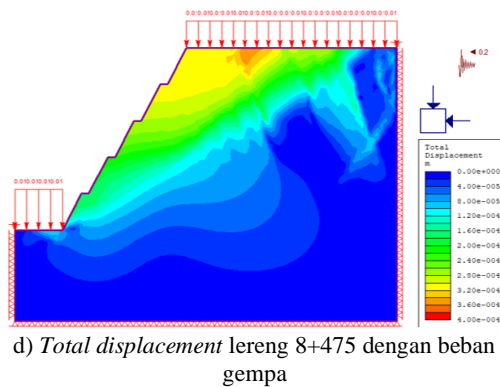
a) Critical SRF dan maximum shear strain lereng STA 8+475 tanpa beban gempa



b) Critical SRF dan maximum shear strain lereng STA 8+475 dengan beban gempa



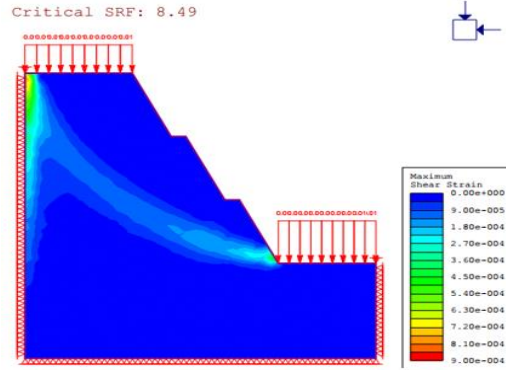
c) Total displacement lereng 8+475 tanpa beban gempa



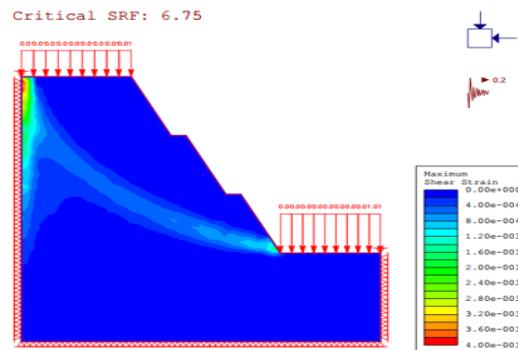
d) Total displacement lereng 8+475 dengan beban gempa

Sumber : hasil analisis (2022)

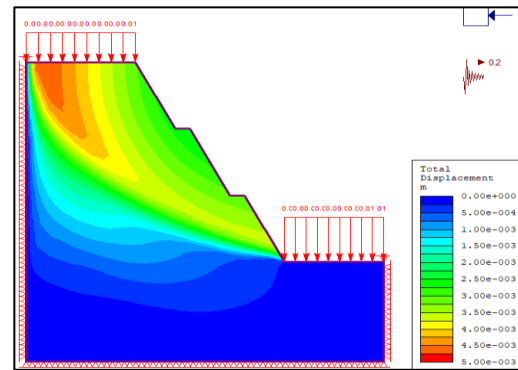
Gambar 8. Hasil analisis kestabilan lereng STA 8+475



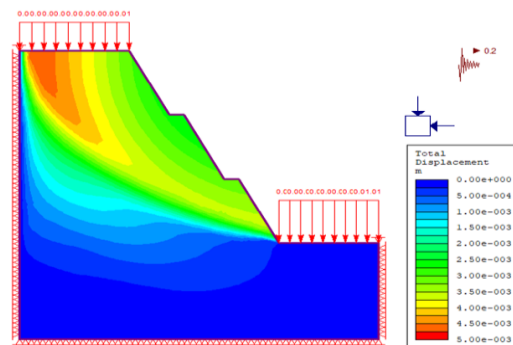
a) Critical SRF dan maximum shear strain lereng STA 9+075 tanpa beban gempa



b) Critical SRF dan maximum shear strain lereng STA 9+075 dengan beban gempa



c) Total displacement lereng 9+075 tanpa beban gempa



d) Total displacement lereng 8+475 dengan beban gempa

Sumber : hasil analisis (2022)

Gambar 9. Hasil analisis kestabilan lereng STA 9+075

Mekanisme keruntuhan lereng dan lokasi bidang keruntuhan dapat diamati dari nilai *maximum shear strain*. Berdasarkan gambar 9.a) dan 9.b) dapat dilihat distribusi kontur *maximum shear strain* pada kondisi tanpa beban gempa dan pada kondisi dengan beban gempa mempunyai kemiripan pola keruntuhan yang sama dengan penyebaran mulai dari kaki lereng hingga bagian atas ujung lereng. Dari Tabel 10 dapat dilihat bahwa besaran nilai *total displacement* lereng STA 9+075 pada kondisi tanpa beban gempa dan pada kondisi dengan beban gempa masih di bawah batas izin yang disyaratkan, sehingga dapat dikatakan lereng berada pada kondisi stabil (aman).

Dari Tabel 10 dapat dilihat bahwa besaran nilai total displacement lereng STA 9+075 pada kondisi tanpa beban gempa dan pada kondisi dengan beban gempa masih di bawah batas izin yang disyaratkan, sehingga dapat dikatakan lereng berada pada kondisi stabil (aman). Nilai tersebut masih memenuhi batas izin yang disyaratkan yaitu 1 m, dan dapat disimpulkan lereng berada pada kondisi stabil (aman).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Ketiga lokasi lereng yang dijadikan sebagai sampel memiliki kualitas massa batuan yang mewakili kondisi buruk (*poor*), sedang (*fair*), dan baik (*good*). Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng dengan metode numerik, maka dapat disimpulkan kondisi lereng yang dijadikan sampel berada dalam kondisi stabil (aman). Nilai faktor keamanan lereng yang dihasilkan pada kondisi tanpa beban gempa berada pada rentang 1,700 – 8,130, sedangkan nilai faktor keamanan lereng yang dihasilkan pada kondisi dengan beban gempa berada pada rentang 1,200 – 6,460. Kedua nilai tersebut melebihi batas izin yang disyaratkan dalam SNI 8460:2017, yaitu lebih dari 1,5 untuk kondisi tanpa beban gempa dan lebih dari 1,1 untuk kondisi dengan beban gempa.

Saran

Penilaian karakterisasi massa batuan yang lebih komprehensif perlu menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan, agar hasil analisis kestabilan lereng representatif berdasarkan kualitas massa batuan yang

mewakili. Untuk lereng dengan kualitas massa batuan baik (*good*) dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendapatkan kemiringan lereng yang optimal sehingga lereng masih dalam kondisi aman dan efisiensi dapat dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Provinsi Jawa Tengah - D.I. Yogyakarta, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas izin penggunaan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M. 2005. *Slope Stability and Stabilization Methods (Second Edition)*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley & Sons, Inc.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik. SNI 8460:2017* (Vol. 8460). Jakarta: BSN
- Deere, D., and Miller, R. 1966. *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. Technical Report No. AFWL-TR-65-116.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., and Brandon, T. L. 2014. *Soil Strength and Slope Stability, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Hammah, R. E., Yacoub, T. E., & Curran, J. H. (2009). *Probabilistic Slope Analysis With the Finite Element Method. All Days*.
- Hoek, E., Carter, T., and Diederichs, M. 2013. Quantification of The Geological Strength Index Chart. In *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium: 1757–1764*.
- Kainthola, A., Singh, P. K., Wasnik, A. B., Sazid, M., and Singh, T. N. 2012. Finite Element Analysis of Road Cut Slopes using Hoek & Brown Failure Criterion. *International Journal of Earth Science and Engineering*, 05(05): 1100–1109.
- Marinos, P. V. 2010. New Proposed Gsi Classification Charts for Weak or Complex Rock Masses. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 43(3): 1248–1258.
- Marinos, P. V. and Hoek E. 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Part 1: estimating rock mass strength. Part 2: estimating tunnel squeezing problems. *Tunnels and Tunneling Int.* 32/11, 45-51 and 32/12, 33-36.
- Pradhan, S. P., and Siddique, T. 2020. Stability Assessment of Landslide-Prone Road Cut Rock Slopes in Himalayan Terrain: A Finite Element Method Based Approach. *Journal of*

- Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12(1): 59–73.
- Saadoun, A., Hafsaoui, A., Khadri, Y., and Fredj, M. 2018. Numerical modeling of slope stability in Chouf amar limestone quarry (M'sila, Algeria). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* 5: 24–29.
- Saadoun, A., Hafsaoui, A., and Fredj, M. 2018. Landslide Study of Lands in Quarrys. Case Chouf Amar-M'sila, Algeria. *Geoenvironmental Engineering, Sustainable Civil Infrastructures* 2: 14–28.
- Sariandi, F., Putra, G. V., Setyorini, G. V., & Saptono, S. 2018. Stope Stability Analysis of Limestone Ex-mined Area at Ponjong Sub-district Special Region of Yogyakarta using Finite Element Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(1): 1-8.
- Sivakugan, N., Shukla, S. K., and Das, B. M. 2013. *Rock Mechanics an Introduction*. Boca Raton: CRC Press.
- Sun, L., Grasselli, G., Liu, Q., Tang, X., & Abdelaziz, A. 2022. The Role of Discontinuities in Rock Slope Stability: Insights from A Combined Finite-Discrete Element Simulation. *Computers and Geotechnics* 147, 104788.
- Surono, Toha, B., dan Sudarno, I. 1992. *Peta Geologi Regional Lembar Surakarta – Giritontro*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.