

Bab IV Analisis Kestabilan Lereng

IV.1 Properti Keteknikan Massa Batuan dan Diskontinuitas

Pengujian sifat fisik batuan dilakukan untuk memperoleh parameter yang dibutuhkan dalam proses analisis kestabilan lereng baik menggunakan metode elemen hingga maupun kesetimbangan batas (Lampiran C). Sifat fisik yang sangat penting untuk analisis yaitu berat isi (γ) batuan penyusun lereng sebagai parameter input dalam analisis. Pengujian sifat fisik dilakukan di laboratorium dengan berdasarkan standar ISRM (1977). Penentuan sifat mekanik massa batuan yang berupa kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), kuat tarik (σ_t), nisbah Poisson (ν), dan modulus deformasi (E_m) menggunakan pendekatan empiris-analitik dengan kurva keruntuhan Hoek-Brown berdasarkan persamaan dari setiap klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMI (Subbab II.3). Kuat geser diskontinuitas ditentukan dengan perhitungan analitik menggunakan kurva empiris untuk mendapatkan nilai kohesi dan sudut geser dalam.

IV.1.1 Sifat Fisik Massa Batuan

Uji sifat fisik dilakukan pada 5 sampel batuan dari setiap lereng di lokasi penelitian meliputi STA 01, STA 02, STA 03, STA 04, dan STA 05. Kelima sampel tersebut mewakili litologi dominan pada lokasi penelitian. Pengujian dilakukan di Laboratorium Geomekanika Tambang, Universitas Islam Bandung dengan prosedur pengujian berdasarkan standar ISRM (1977) dengan data yang diperoleh berupa massa alami, massa jenuh air, massa kering, berat isi alami, berat isi jenuh, kadar air, dan porositas. Rekapitulasi dari data uji sifat fisik sampel batuan secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran B.

Secara umum batuan penyusun lereng di lokasi penelitian memiliki kisaran berat isi sebesar 25,4-27,1 kN/m³ dengan nilai berat isi jenuh yang relatif tidak jauh berbeda (Tabel IV.1). Porositas batuan memiliki nilai berkisar 1,11 % hingga 4,26% dengan kadar air berkisar antara 0,15% hingga 0,40%. Berat isi merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk analisis kestabilan lereng dengan metode elemen hingga dan kesetimbangan batas. Berat isi massa batuan pada model longsoran guling dan baji merupakan besar beban yang bekerja pada blok-blok

batuan di sepanjang muka lereng. Semakin besar nilai berat isi, maka semakin besar juga gaya penggerak yang akan bekerja pada lereng batuan.

Tabel IV.1 Hasil pengujian sifat fisik batuan pada lereng penelitian

Sampel	Berati isi alami (kN/m ³)	Berat isi jenuh (kN/m ³)	Kadar air (%)	Porositas (%)
STA 01	26.2	26.5	0.33	3.69
STA 02	27.1	27.2	0.5	1.11
STA 03	25.4	25.7	0.40	4.26
STA 04	26.4	26.6	0.25	2.45
STA 05	26.8	27.0	0.15	2.43

IV.1.2 Sifat Mekanik Massa Batuan

Dalam pemodelan dan perhitungan kestabilan lereng, data dari sifat mekanik yang menjadi masukan dalam pemodelan diperoleh dari uji laboratorium yang dapat diperoleh melalui uji tekan uniaksial dan uji tekan triaksial pada batuan utuh. Akan tetapi nilai yang diperoleh dari uji laboratorium menggambarkan kekuatan batuan utuh dan bukan kekuatan massa batuan. Pada umumnya kekuatan massa batuan akan memiliki nilai yang lebih rendah yang disebabkan oleh keberadaan diskontinuitas pada massa batuan. Kekuatan massa batuan bisa ditentukan dengan uji *in situ* dengan peralatan tertentu, akan tetapi uji tersebut akan memerlukan biaya yang cukup besar. Perhitungan secara analitik dengan menggunakan metode empiris dari klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMi dapat dijadikan solusi untuk menentukan kekuatan massa batuan. Setiap klasifikasi massa batuan tersebut memiliki parameter yang berbeda dalam penentuan konstanta Hoek-Brown (m_b , s , dan a), kuat massa batuan (σ'_{cm}), dan modulus deformasi (E_m), sehingga akan menghasilkan nilai properti keteknikan yang berbeda dari setiap metode klasifikasi massa batuan terhadap ekuivalensi keruntuhan Mohr Coloumb untuk mendapatkan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

Konstanta m_b merupakan nilai reduksi dari konstanta m_i akibat penurunan kekuatan oleh berbagai kondisi massa batuan berdasarkan nilai faktor ketergangguan (D). Konstanta m_i merupakan suatu parameter kurva *fitting* yang diperoleh dari hasil uji triaksial batuan utuh. Parameter ini bernilai khas untuk setiap jenis batuan. Pada umumnya batugamping memiliki nilai m_i berkisar antara 9-12, untuk nilai m_i pada

penelitian ini diasumsikan nilai m_i pada batugamping yaitu 9. Menurut Hoek dan Brown (2018) semakin tinggi nilai GSI semakin besar nilai konstanta mb dan s , namun nilai a menjadi lebih kecil. Pada massa batuan buruk nilai s mendekati 0, sedangkan pada massa batuan baik nilai s mendekati 1 dengan kurva berbentuk eksponensial. Konstanta a pada batuan utuh bernilai 0,5 pada massa batuan baik dan bernilai 0,6 pada batuan berkualitas buruk. Untuk konstanta a pada klasifikasi massa batuan RMR dan RMi digunakan asumsi nilai a adalah 0,5.

Penentuan parameter lain pada properti keteknikan yang meliputi tegangan normal efektif, kuat tarik, *upper limit confining stress*, kohesi, sudut geser dalam, dan kuat geser menggunakan persamaan yang sama pada setiap klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMi (Subbab II.3). Hal ini bertujuan untuk mengintegrasikan nilai konstanta yang berbeda dari setiap parameter klasifikasi massa batuan dapat dibandingkan dengan menggunakan persamaan yang sama. Hasil properti keteknikan dapat dilihat pada Tabel IV.2 di bawah ini.

Tabel IV.2 Hasil perhitungan properti keteknikan

Lokasi	Klasifikasi Massa Batuan	Bobot	mb	a	s	E_m (GPa)	c (MPa)	ϕ (°)	σ_t (MPa)	ν
STA 01	GSI	65	1.315	0.5020	0.006	11.22	0.641	53.07	-0.253	0.27
	RMR	64.99	2.605	0.5000	0.021	9.95	1.073	56.43	-0.419	0.27
	RMi	6.39	2.818	0.5000	0.067	11.23	2.168	52.08	-1.152	0.27
STA 02	GSI	60	0.999	0.5028	0.003	8.40	0.469	51.32	-0.160	0.28
	RMR	62.68	2.316	0.5000	0.015	8.36	0.945	55.90	-0.351	0.28
	RMi	2.27	1.022	0.5000	0.006	7.62	0.796	50.47	-0.374	0.29
STA 03	GSI	55	0.759	0.5040	0.001	5.34	0.294	46.81	-0.073	0.32
	RMR	60.25	2.123	0.5000	0.011	6.96	0.637	53.56	-0.210	0.29
	RMi	3.49	2.217	0.5000	0.038	8.95	1.171	50.08	-0.593	0.28
STA 04	GSI	60	0.999	0.5028	0.003	7.24	0.477	44.70	-0.119	0.29
	RMR	60.64	2.216	0.5000	0.013	7.17	0.768	50.36	-0.224	0.29
	RMi	3.07	1.831	0.5000	0.024	8.53	1.135	47.29	-0.537	0.28
STA 05	GSI	48	0.517	0.5066	0.001	3.93	0.427	37.01	-0.048	0.34
	RMR	57.83	1.918	0.5000	0.008	5.80	0.908	47.57	-0.212	0.31
	RMi	4.64	2.256	0.5000	0.040	9.96	1.708	46.23	-0.813	0.27

IV.1.3 Sifat Mekanik Diskontinuitas

Pada umumnya kuat geser diskontinuitas diwakili oleh kuat geser batuan utuh melalui uji geser langsung atau dengan merekayasa rekahan pada batuan utuh terlebih dahulu sebelum dilakukan uji geser langsung yang dapat merepresentasikan diskontinuitas pada massa batuan. Penentuan sifat geser diskontinuitas dengan uji laboratorium membutuhkan biaya yang cukup besar, sebagai alternatif digunakan

metode analitik dengan kurva empiris pada kurva keruntuhan Barton-Bandis untuk mendapatkan sifat mekanik diskontinuitas. Input parameter pada keruntuhan Barton-Bandis menggunakan nilai JRC, JCS, sudut geser dalam dasar, dan tegangan efektif. Parameter-parameter tersebut dapat menghasilkan nilai kuat geser ekuivalensi Mohr-Coulomb untuk diskontinuitas pada massa batuan.

Pada longsoran guling dengan tipe *block-flexural* akan dijumpai dua set diskontinuitas yang membangun *block-flexural toppling* ditandai dengan *joint 1* dan *joint 2*. *Joint 1* merupakan set diskontinuitas yang menyebabkan potensi longsoran guling dengan orientasi diskontinuitas berlawanan dengan arah lereng dan memiliki kemiringan cukup curam. Pada penelitian ini *joint 1* diasumsikan merupakan pembentuk longsoran guling yang berupa bidang perlapisan batuan yang memiliki persistensi atau panjang bidang diskontinuitas lebih dari 10 meter membentuk kolom-kolom pada massa batuan secara menerus. *Joint 2* merupakan set diskontinuitas yang memiliki orientasi relatif tegak lurus terhadap *joint 1* yang membagi kolom-kolom pada massa batuan dari *joint 1* menjadi berbentuk blok. *Joint 2* ini pada umumnya memiliki persistensi sekitar 1-5 meter di lokasi penelitian yang dapat berupa kekar gerus ataupun kekar. Setiap set diskontinuitas pada *joint 1* dan *joint 2* dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan II.6-II.9. Nilai yang digunakan dalam analisis deterministik adalah nilai rata-rata kuat geser tiap diskontinuitas pada setiap set (Tabel IV.3).

Pada longsoran baji, dijumpai dua set diskontinuitas yang akan membangun sistem longsoran baji, yaitu *joint 1* dan *joint 2*. *Joint 1* dan *joint 2* di lokasi penelitian dapat berupa bidang perlapisan, kekar gerus, dan kekar geser yang pada prinsipnya saling memotong terhadap kondisi muka lereng yang disebutkan pada subbab II.4.2. Setiap set diskontinuitas yang mewakili *joint 1* dan *joint 2* dilakukan perhitungan dengan persamaan II.6-II.9.

Tabel IV.3 Rekapitulasi perhitungan kuat geser diskontinuitas

Lokasi	<i>Joint 1</i>			<i>Joint 2</i>		
	JRC rata-rata	c rata-rata (MPa)	Φ rata-rata ($^{\circ}$)	JRC rata-rata	c rata-rata (MPa)	Φ rata-rata ($^{\circ}$)
STA 01	6.5	0.029	31.04	7.2	0.033	32.19
STA 02	8.2	0.028	32.21	9	0.032	34.22
STA 03	9.5	0.031	36.86	11	0.037	37.54
STA 04	6.5	0.034	29.52	7.1	0.03	28.13
STA 05	5.8	0.019	27.18	6.3	0.022	28.67

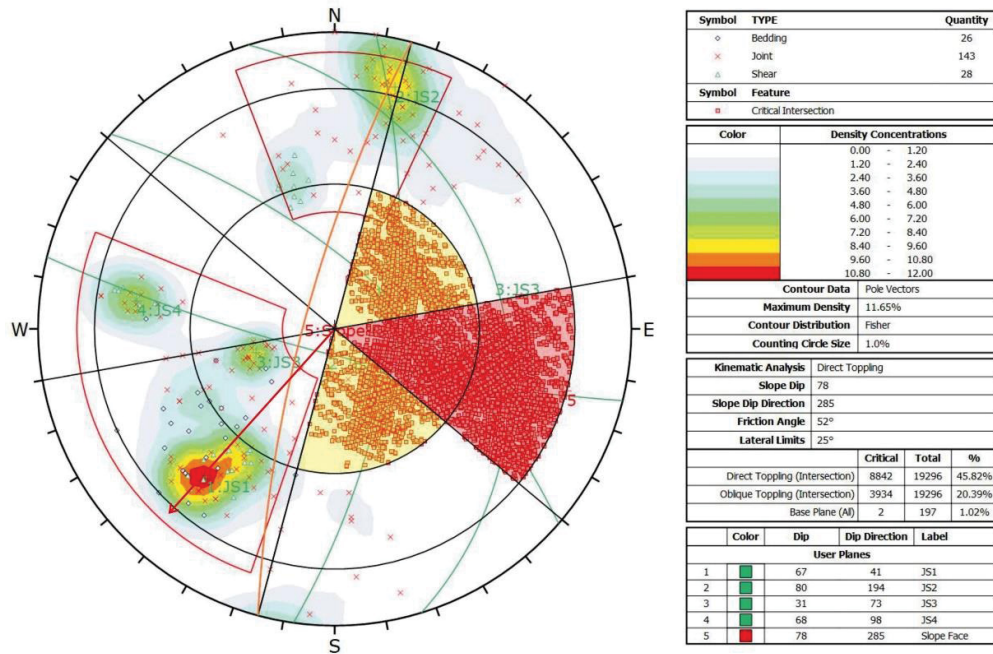
Dari Tabel IV.3 di atas dapat terlihat nilai kohesi dan sudut geser dalam pada STA 03 memiliki nilai paling tinggi dibandingkan dengan lereng lokasi lain. Hal ini dapat diartikan bahwa STA 03 memiliki diskontinuitas dengan tingkat kekasaran yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan lereng lokasi lain yang ditandai dengan nilai JRC rata-rata lebih tinggi. Lereng lain dapat dimungkinkan proses pelapukan yang terjadi pada diskontinuitas lebih intens dibandingkan di STA 03 yang mengakibatkan permukaan diskontinuitas lebih halus dan relatif lebih *planar*.

IV.2 Analisis Kinematika

Identifikasi jenis potensi longsoran di area lokasi penelitian dilakukan dengan pengamatan langsung dan dengan analisis kinematika. Pengamatan langsung berupa pengamatan tipe dan orientasi diskontinuitas pada lereng batuan yang memiliki potensi longsoran guling ataupun longsoran baji sesuai dengan ciri khas deskripsi longsoran berdasarkan Amini dkk. (2012) dan Wyllie dan Mah (2005). Pengamatan langsung ini nantinya akan dikombinasikan dengan analisis kinematika untuk mengidentifikasi jenis longsoran di lokasi penelitian.

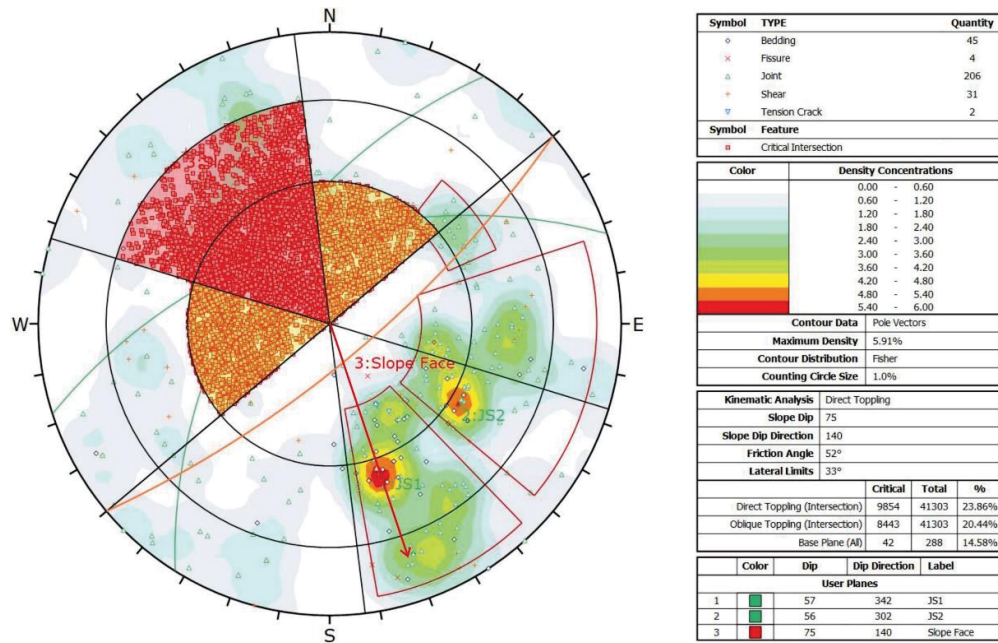
Pada lereng STA 01, analisis kinematika menunjukkan potensi longsoran guling. Potensi longsoran guling dibentuk oleh set diskontinuitas (JS1) dengan arah diskontinuitas arah kemiringan/kemiringan N141°E/67° yang relatif tegak lurus terhadap muka lereng N285°E dan kemiringan 78° dengan kontur maksimum seperti pada Gambar IV.1. Komponen pada *joint set* (JS1) didominasi oleh arah perlapisan batuan dan kekar sebagai kolom batuan yang menjadi longsoran guling, sedangkan pada JS2 merupakan bidang diskontinuitas yang dominan berupa kekar gerus dan kekar yang memotong JS1 dengan kemiringan yang lebih landai dari

kemiringan lereng. Orientasi arah kemiringan/kemiringan dari JS2 ini berarah N190°E/70°. Berdasarkan posisi kontur maksimum pada JS1 yang menyebabkan potensi longsoran guling terhadap arah muka lereng, dapat diinterpretasikan bahwa longsoran guling akan terjadi dengan arah N220°E dari muka lereng.



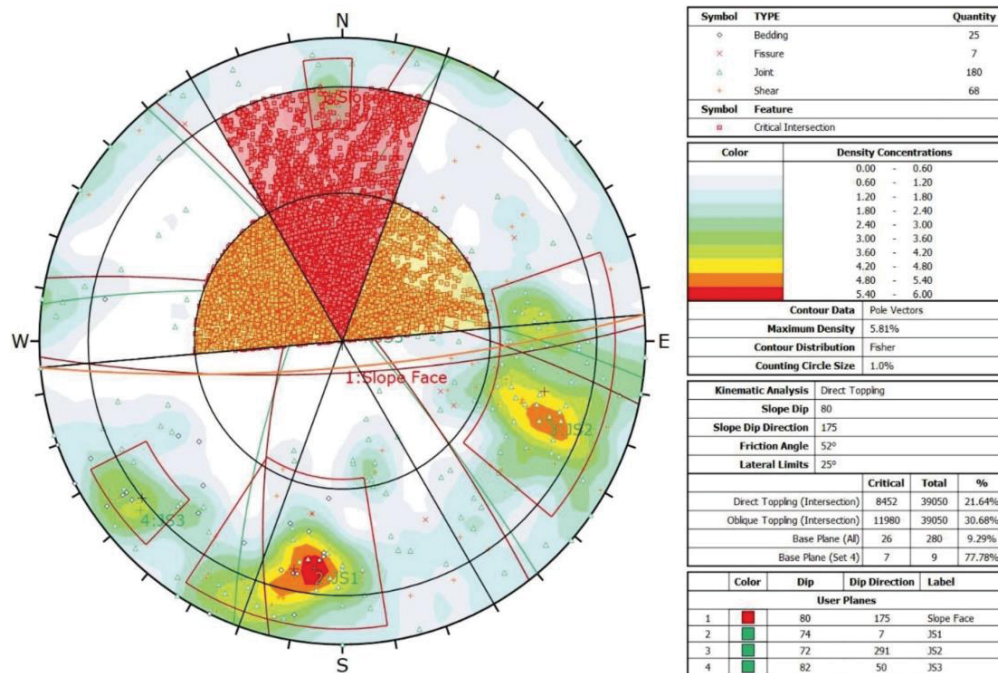
Gambar IV.1 Analisis kinematika longsoran guling STA 01.

Analisis kinematika pada lereng STA 02 menunjukkan potensi longsoran guling. Potensi longsoran guling dibentuk oleh set diskontinuitas JS1 dengan arah kemiringan/kemiringan diskontinuitas N342°E/57° yang relatif tegak lurus terhadap muka lereng N140°E dan kemiringan 75° dengan kontur maksimum seperti pada Gambar IV.2. Komponen pada *joint set* (JS1) didominasi oleh arah perlapisan batuan dan kekar sebagai kolom batuan yang menjadi longsoran guling, sedangkan pada JS2 merupakan bidang diskontinuitas yang dominan berupa kekar gerus dan kekar yang memotong JS1 dengan kemiringan yang lebih landai dari kemiringan lereng. Orientasi arah kemiringan/kemiringan dari JS2 ini berarah N158°E/72°. Berdasarkan posisi kontur maksimum pada JS1 yang menyebabkan potensi longsoran guling terhadap arah muka lereng, dapat diinterpretasikan bahwa longsoran guling akan terjadi dengan arah N160°E dari muka lereng.



Gambar IV.2 Analisis kinematika longsoran guling STA 02.

Analisis kinematika pada lereng STA 03 menunjukkan potensi longsoran guling. Potensi longsoran guling dibentuk oleh set diskontinuitas JS1 dengan arah kemiringan/kemiringan diskontinuitas N 7° E/74° yang relatif tegak lurus terhadap muka lereng N175°E dan kemiringan 80° dengan kontur maksimum seperti pada Gambar IV.3. Komponen pada *joint set* (JS1) didominasi oleh arah perlapisan batuan dan kekar sebagai kolom batuan yang menjadi longsoran guling, sedangkan pada JS2 merupakan bidang diskontinuitas yang dominan berupa kekar gerus dan kekar yang memotong JS1 dengan kemiringan yang lebih landai dari kemiringan lereng. Orientasi arah kemiringan/kemiringan JS2 ini berarah N176°E/75°. Berdasarkan posisi kontur maksimum pada JS1 yang menyebabkan potensi longsoran guling terhadap arah muka lereng, dapat diinterpretasikan bahwa longsoran guling akan terjadi dengan arah N184°E dari muka lereng.

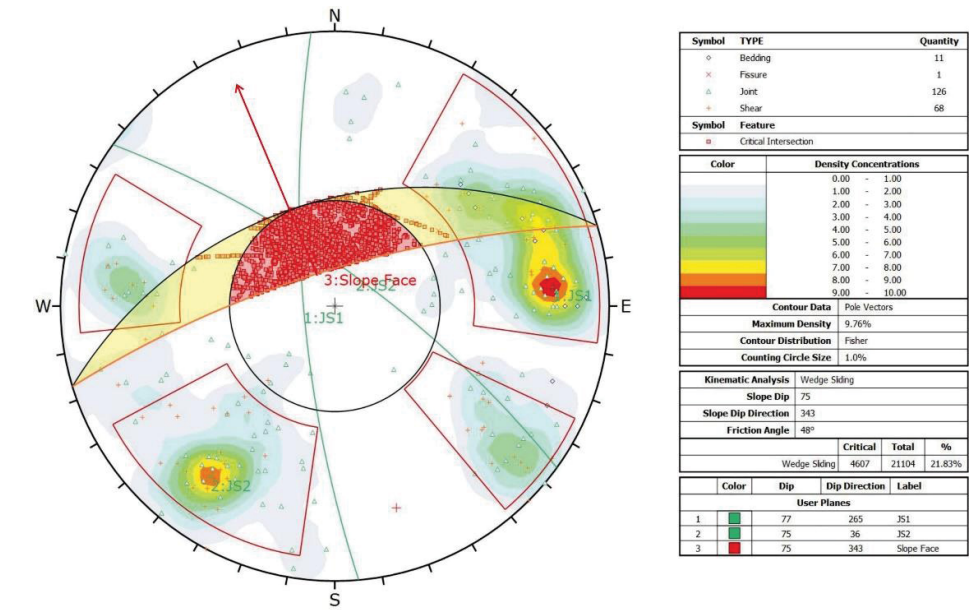


Gambar IV.3 Analisis kinematika longsoran guling STA 03.

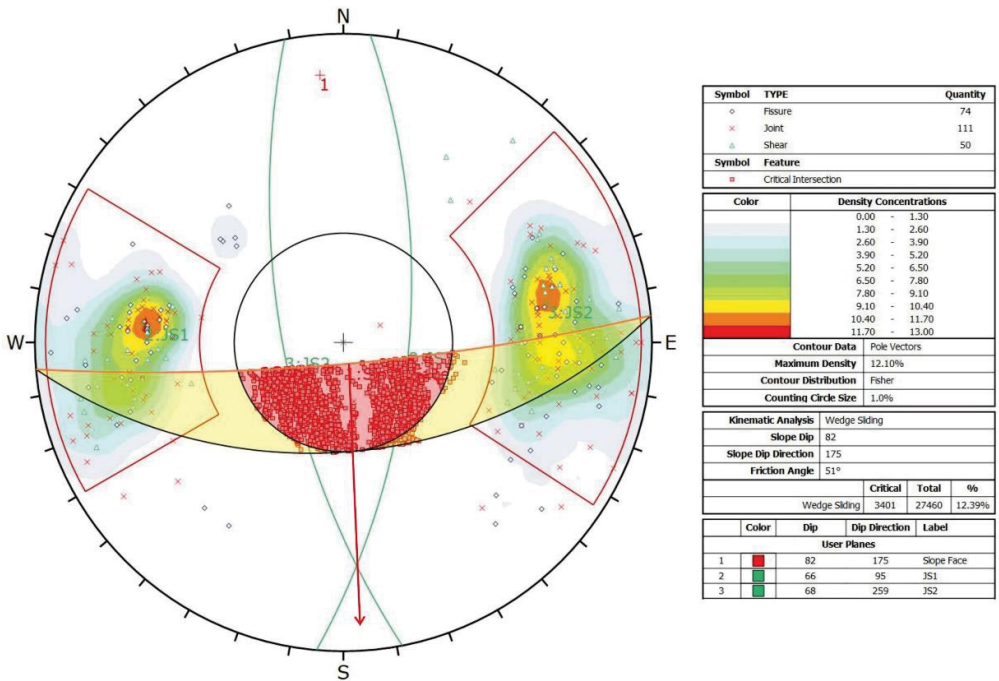
Pada lereng STA 04, analisis kinematika menunjukkan potensi longsoran baji. Potensi longsoran baji pada lokasi ini dibentuk oleh set diskontinuitas JS1 dan JS2 yang berpasangan dan berpotongan dengan arah kemiringan/kemiringan bidang diskontinuitas N265°E/77° dan N36°E/75°. Set diskontinuitas pada JS1 didominasi oleh kekar gerus dan bidang perlapisan batuan, sedangkan JS2 didominasi oleh kekar gerus dan kekar (Gambar IV.4). Pada analisis stereografis perpotongan dari dua set diskontinuitas tersebut berada di depan muka lereng dengan arah orientasi muka lereng N343°E dan kemiringan lereng 75°. Berdasarkan analisis stereografis, potensi longsoran baji di STA 04 memiliki arah longsoran relatif N338°E.

Analisis kinematika pada lereng STA 05 menunjukkan potensi longsoran baji. Potensi longsoran baji pada lokasi ini dibentuk oleh set diskontinuitas JS1 dan JS2 yang berpasangan dan berpotongan dengan arah kemiringan/kemiringan bidang diskontinuitas N95°E/66° dan N259°E/68°. Set diskontinuitas pada JS1 didominasi oleh kekar gerus dan kekar, sedangkan JS2 didominasi oleh kekar gerus (Gambar IV.5). Pada analisis stereografis perpotongan dari dua set diskontinuitas tersebut berada di depan muka lereng dengan arah orientasi muka lereng N175°E dan

kemiringan lereng 80°. Berdasarkan analisis stereografis, potensi longsoran baji di STA 05 memiliki arah longsoran relatif N178°E.



Gambar IV.4 Analisis kinematika longsoran baji STA 04.



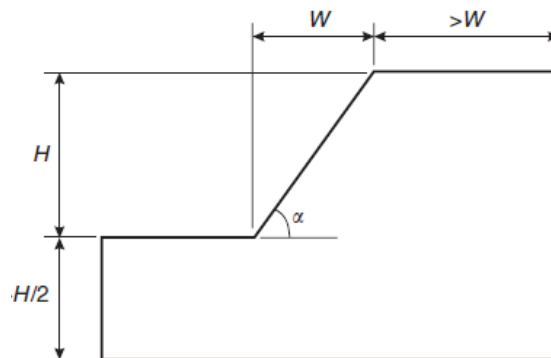
Gambar IV.5 Analisis kinematika longsoran baji STA 05.

IV.3 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Analisis dengan metode elemen hingga ini bertujuan untuk dapat membandingkan nilai dari properti keteknikan klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMI terhadap nilai faktor keamanan yang didapatkan. Faktor keamanan yang didapatkan merupakan hasil dari analisis dengan pendekatan model lereng yang dibuat sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Keberadaan penyangga dari setiap klasifikasi massa batuan dimodelkan dengan menggunakan analisis elemen hingga untuk mengetahui rekomendasi penyangga yang dapat memberikan nilai faktor keamanan optimum pada lereng.

IV.3.1 Prosedur Pembuatan Model

Hal pertama yang dilakukan dalam melakukan analisis kestabilan lereng yaitu menentukan model lereng terlebih dahulu. Model tersebut dibuat berdasarkan geometri lereng yang didapatkan di lapangan. Analisis numerik dengan metode elemen hingga ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak RS2 dari *student trial license Rocscience*. Model pada lereng ini mengacu pada bentuk model yang diajukan oleh Wyllie dan Mah (2005) pada Gambar IV.6.



Gambar IV.6 Model geometri lereng (Wyllie dan Mah, 2005).

Pada analisis elemen hingga terdapat beberapa pengaturan dalam pembentukan model lereng untuk dapat melakukan analisis. Pengaturan pada *mesh* atau jaringan model digunakan tipe *uniform* dengan tipe elemen *3 noded triangles* dan jumlah elemen *mesh* sebesar 1500. *Displacement* dari model digunakan *x,y displacement* dengan simbol segitiga kecil untuk mengunci model lereng bagian luar, sehingga model yang memiliki *displacement* atau perpindahan ketika

dilakukan analisis hanya berada di area sekitar lereng saja. Beban pada lereng digunakan tegangan tipe *gravity* dengan *actual ground surface* untuk memberikan tegangan sesuai dengan kondisi geometri model lereng batuan. Beban seismik ditambahkan dengan input koefisien seismik horizontal, sedangkan koefisien seismik vertikal diasumsikan memiliki nilai 0. Beban seismik ini ditambahkan untuk memberikan beban lereng pada saat guncangan gempa bumi yang terjadi dengan asumsi analisis tersebut bersifat pseudostatik.

Nilai properti mekanik dari massa batuan dan diskontinuitas berbeda. Pada properti mekanik massa batuan diperoleh dari metode empiris klasifikasi massa batuan berupa nilai kohesi, sudut geser dalam, kuat tarik, dan nisbah Poisson dengan hasil yang tertera pada Tabel IV.2, sedangkan properti mekanik dari diskontinuitas yang berupa nilai kohesi dan sudut geser dalam diperoleh dari kriteria Barton – Bandis dengan hasil yang tertera pada Tabel IV.3. Properti keteknikan tersebut dibuat berbeda karena nilai properti mekanik dari massa batuan dianggap mewakili lereng batuan di lokasi penelitian, sehingga pada model seperti Gambar IV.6 akan memiliki nilai properti mekanik massa batuan. Untuk dapat mensimulasikan keadaan seperti di lapangan, kondisi diskontinuitas dibuat pada model dengan nilai properti mekaniknya tersendiri agar model deformasi dari potensi longsoran guling khususnya sesuai dari kondisi diskontinuitasnya.

Model dari set diskontinuitas yang dapat ditampilkan pada analisis elemen hingga yaitu pada tipe longsoran guling, sedangkan pada longsoran baji hanya ditampilkan garis perpotongan dua set diskontinuitas yang membentuk longsoran baji pada lereng yang diperoleh dari model kesetimbangan batas. Longsoran guling dimodelkan dengan dua set diskontinuitas yang saling berpotongan. Set diskontinuitas yang pertama (*joint 1*) yaitu diskontinuitas yang orientasinya cenderung tegak lurus terhadap muka lereng dan membagi massa batuan dalam bentuk kolom blok batuan, set diskontinuitas ini diasumsikan sebagai bidang perlapisan batuan yang memiliki persistensi lebih dari 10 meter. Set diskontinuitas yang kedua (*joint 2*) merupakan diskontinuitas yang berpotongan dengan set diskontinuitas pertama (*joint 1*) dengan arah kemiringan lebih rendah dari

kemiringan muka lereng, set diskontinuitas ini diasumsikan sebagai bidang kekar yang secara acak memotong set diskontinuitas pertama. Model diskontinuitas pada *joint 1* digunakan *parallel deterministic* dengan nilai rata-rata spasi diskontinuitas, sedangkan pada *joint 2* digunakan *parallel statistical* dengan menggunakan distribusi normal untuk penyebaran diskontinuitas.

Model yang digunakan diasumsikan dalam keadaan model pseudostatik. Hal ini dikarenakan untuk mempertimbangkan adanya beban pada lereng jika suatu ketika terjadi gempa bumi dan bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan lereng di lokasi penelitian saat terjadi gempa bumi. Pada analisis dengan metode pseudostatik, pengaruh gempa digambarkan dengan percepatan horizontal. Analisis ini menunjukkan pengaruh seismik dengan percepatan pseudostatik yang menghasilkan gaya inersia, F_h yang bekerja pada pusat massa keruntuhan. Penentuan nilai koefisien seismik horizontal k_h mengacu pada SNI 8460 (2016). Koefisien seismik yang digunakan adalah percepatan puncak di permukaan (PGA) dengan faktor keamanan minimum terhadap gempa ($FK > 1,1$). Koefisien seismik k_h ditentukan dari percepatan puncak horizontal dengan penentuan kelas situs dan faktor amplifikasi (Tabel II.7).

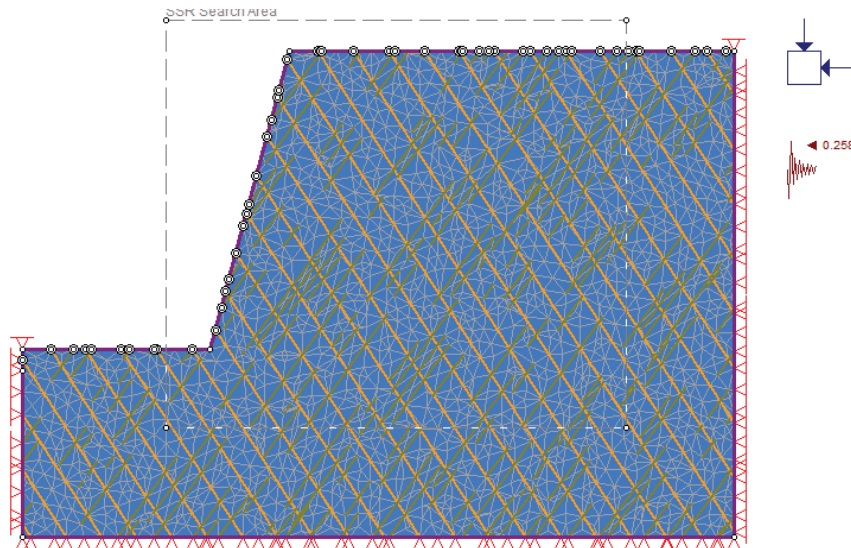
IV.3.2 Prosedur Analisis Longsoran Guling

Analisis kestabilan lereng pada longsoran guling dengan metode elemen hingga dilakukan setelah pembuatan model lereng terpenuhi. Adapun input parameter properti mekanik dilakukan terhadap material massa batuan pada model lereng dan properti mekanik pada diskontinuitas *joint 1* dan *joint 2*, kemudian setelah semua input parameter lengkap dilakukan proses komputasi oleh perangkat lunak untuk mendapatkan nilai faktor keamanan. Digunakan *SSR windows* di area model lereng agar analisis *shear strength reduction* difokuskan di sekitar lereng saja.

IV.3.2.1 Kestabilan lereng STA 01

Pada model lereng STA 01 memiliki geometri dengan tinggi lereng 18 meter dengan kemiringan muka lereng 78° (Gambar IV.7). Model STA 01 ini terdapat dua set diskontinuitas (*joint 1* dan *joint 2*) yang mempengaruhi longsoran guling. *Joint*

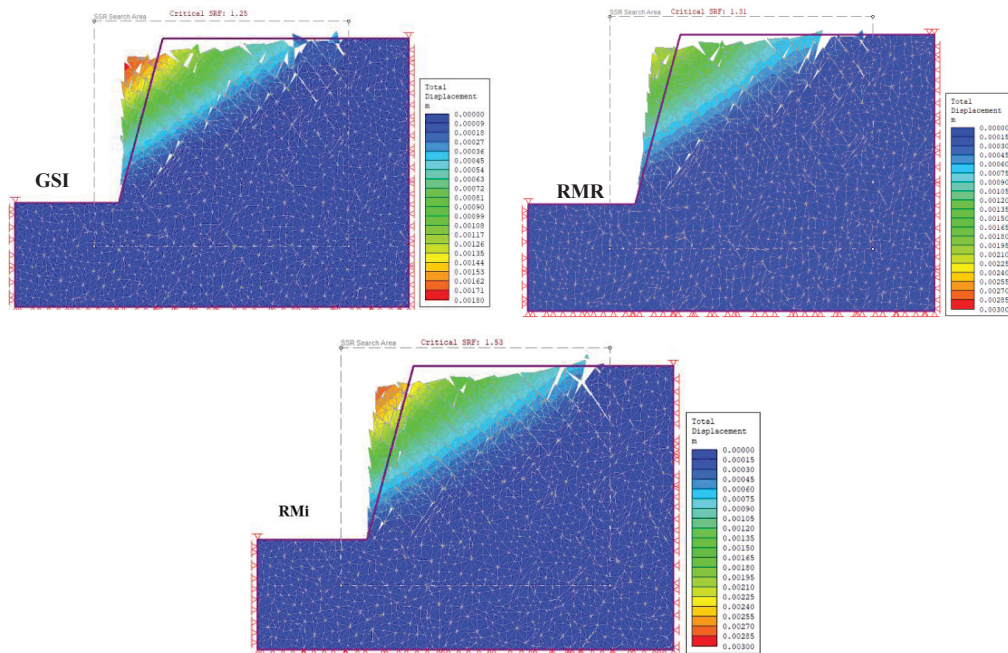
1 memiliki spasi diskontinuitas 1,5 meter dan kemiringan diskontinuitas 67° . Properti mekanik pada *joint 1* menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dengan kohesi 0,029 MPa, sudut geser dalam $31,04^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 MPa. *Joint 2* memiliki kemiringan 70° , spasi rata-rata 0,3 meter (standar deviasi 0,2), panjang diskontinuitas rata-rata 2,5 meter (standar deviasi 0,5), dan persistensi rata-rata 0,5 (standar deviasi 0,3). Properti mekanik pada *joint 2* menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dengan kohesi 0,033 MPa, sudut geser dalam $32,19^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 MPa.



Gambar IV.7 Model lereng pada STA 01, *joint 1* ditunjukkan dengan warna kuning dan *joint 2* warna hijau.

Parameter properti keteknikan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb yang meliputi kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), kuat tarik (σ_t), nisbah Poisson (ν), dan modulus deformasi (E_m) dari setiap klasifikasi massa batuan yang diinput ke dalam model lereng dapat dilihat pada Tabel IV.2. Berat isi (γ) dari lereng STA 01 yaitu $26,2 \text{ kN/m}^3$. Analisis pada model ini dilakukan dengan asumsi kondisi *elastic-plastic*, yaitu kurva dari nilai kuat massa batuan pada saat mengalami keruntuhan akan bersifat linear, oleh karena itu nilai reduksi dari kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tarik memiliki nilai yang sama. Pada model ini dilakukan juga analisis SSR (*Shear*

Strength Reduction) untuk mereduksi nilai kuat massa batuan terhadap deformasi yang terjadi pada lereng (Gambar IV.8).

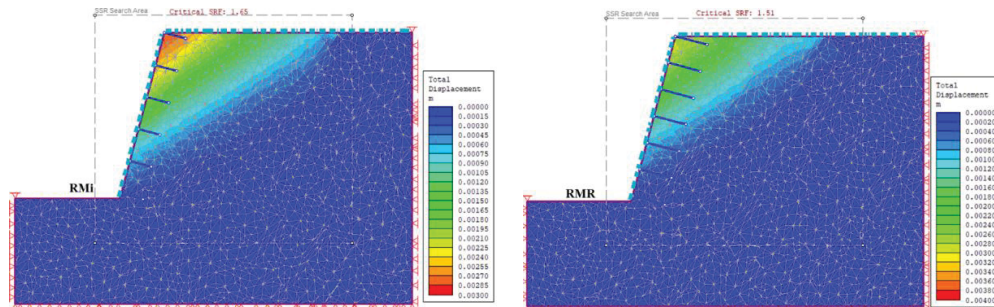


Gambar IV.8 Model deformasi longsor guling STA 01.

Berdasarkan analisis dengan metode elemen hingga, didapatkan nilai faktor keamanan lereng STA 01 pada klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMI sebesar 1,25, 1,31, dan 1,53 dengan besar nilai perpindahan total sebesar 1,7 mm, 2,2 mm, dan 2,8 mm. Dari ketiga klasifikasi massa batuan menghasilkan nilai di atas ambang batas $FK > 1,1$ (SNI 8460, 2016), sehingga dapat diindikasikan bahwa lereng pada STA 01 dalam keadaan stabil. Nilai faktor keamanan yang lebih besar ditunjukkan oleh klasifikasi RMI dengan nilai 1,53.

Rekomendasi penyangga pada setiap klasifikasi massa batuan di lereng STA 01 dapat diterapkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Rekomendasi penyangga dari klasifikasi RMR dan RMI (Tabel III.10) akan digunakan pada analisis ini, sedangkan klasifikasi GSI tidak digunakan karena tidak memiliki rekomendasi sistem penyangga. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan rekomendasi penyangga, didapatkan faktor keamanan pada klasifikasi RMR dan RMI sebesar 1,51 dan 1,65 dengan nilai total perpindahan sebesar 0,9 mm dan 1,6

mm. Rekomendasi penyangga pada sistem RMI cukup baik dengan nilai FK yang dihasilkan lebih tinggi dari sistem penyangga RMR (Gambar IV.9).



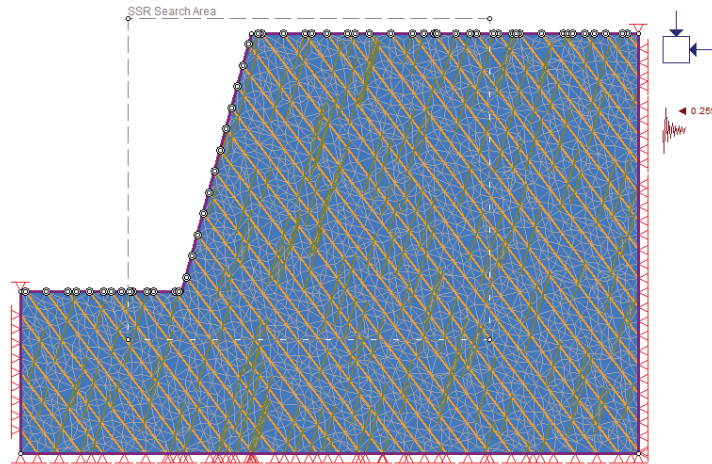
Gambar IV.9 Model sistem penyangga pada longsor guling STA 01.

IV.3.2.2 Kestabilan lereng STA 02

Model lereng STA 02 memiliki geometri dengan tinggi lereng 20 meter dan kemiringan muka lereng 75° (Gambar IV.10). Pada model STA 02 ini terdapat dua set diskontinuitas (*joint 1* dan *joint 2*) yang mempengaruhi longsor guling. *Joint 1* memiliki spasi diskontinuitas 1,2 meter dan kemiringan diskontinuitas 57° . Properti mekanik pada *joint 1* menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dengan kohesi 0,028 MPa, sudut geser dalam $32,21^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100,000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 MPa. *Joint 2* memiliki kemiringan 70° , spasi rata-rata 0,342 meter (standar deviasi 0,2), panjang diskontinuitas rata-rata 3 meter (standar deviasi 0,5), dan persistensi rata-rata 0,6 (standar deviasi 0,3). Properti mekanik pada *joint 2* menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dengan kohesi 0,032 MPa, sudut geser dalam $34,22^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 MPa.

Parameter properti keteknikan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb yang meliputi kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), kuat tarik (σ_t), nisbah Poisson (ν), dan modulus deformasi (E_m) dari setiap klasifikasi massa batuan yang diinput ke dalam model lereng dapat dilihat pada Tabel IV.2. Berat isi (γ) dari lereng STA 02 yaitu $27,1 \text{ kN/m}^3$. Analisis pada model ini dilakukan dengan asumsi kondisi *elastic-plastic*, yaitu kurva dari nilai kuat massa batuan pada saat mengalami keruntuhan akan

bersifat linear, oleh karena itu nilai reduksi dari kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tarik memiliki nilai yang sama. Pada model ini dilakukan juga analisis SSR (*Shear Strength Reduction*) untuk mereduksi nilai kuat massa batuan terhadap deformasi yang terjadi pada lereng (Gambar IV.11).

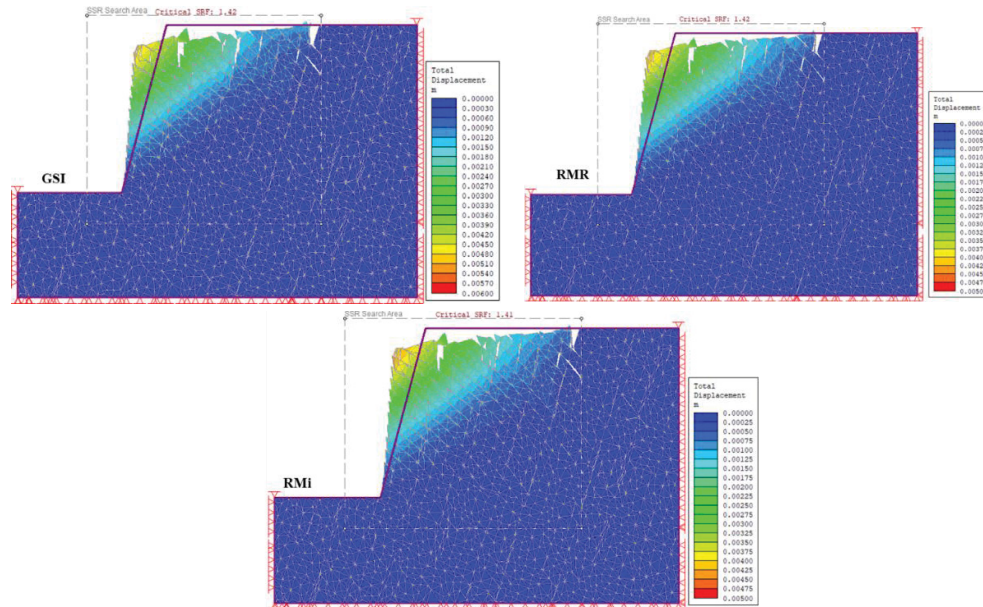


Gambar IV.10 Model lereng pada STA 02, *joint 1* ditunjukkan dengan warna kuning dan *joint 2* warna hijau.

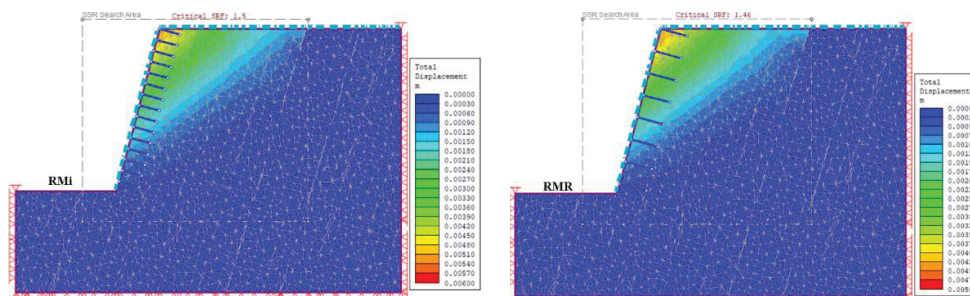
Berdasarkan analisis dengan metode elemen hingga, didapatkan nilai faktor keamanan lereng STA 02 pada klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMI sebesar 1,42, 1,42, dan 1,41 dengan besar nilai perpindahan total sebesar 4 mm, 5 mm, dan 4 mm. Dari ketiga klasifikasi massa batuan menghasilkan nilai di atas ambang batas $FK > 1,1$ (SNI 8460, 2016), sehingga dapat diindikasikan bahwa lereng pada STA 02 dalam keadaan stabil. Nilai faktor keamanan dari setiap klasifikasi massa batuan hampir sama dengan beda 0,01 pada klasifikasi RMI.

Rekomendasi penyangga pada setiap klasifikasi massa batuan di STA 02 dapat diterapkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Rekomendasi penyangga dari klasifikasi RMR dan RMI (Tabel III.10) akan digunakan pada analisis ini, sedangkan klasifikasi GSI tidak digunakan karena tidak memiliki rekomendasi sistem penyangga. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan rekomendasi penyangga, didapatkan faktor keamanan pada klasifikasi RMR dan RMI sebesar 1,46 dan 1,5 dengan nilai total perpindahan sebesar 1,5 mm dan 1,5 mm.

Rekomendasi penyangga pada sistem RMI cukup baik di lereng STA 02 dengan nilai FK yang dihasilkan lebih tinggi dari sistem penyangga RMR (Gambar IV.12).



Gambar IV.11 Model deformasi longsoran guling STA 02.

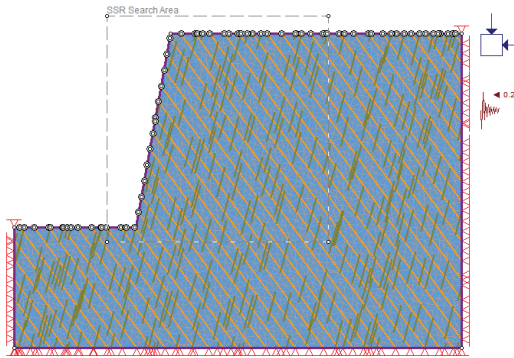


Gambar IV.12 Model sistem penyangga pada longsoran guling STA 02.

IV.3.2.3 Kestabilan lereng STA 03

Model lereng STA 03 memiliki geometri dengan tinggi lereng 25 meter dan kemiringan muka lereng 80° (Gambar IV.13). Model STA 03 ini terdapat dua set diskontinuitas (*joint 1* dan *joint 2*) yang mempengaruhi longsoran guling. *Joint 1* memiliki spasi diskontinuitas 1,5 meter dan kemiringan diskontinuitas 74° . Properti mekanik pada *joint 1* menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dengan kohesi 0,031 MPa, sudut geser dalam $38,05^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan

sebesar 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 MPa. *Joint 2* memiliki kemiringan 75° , spasi rata-rata 0,456 meter (standar deviasi 0,35), panjang diskontinuitas rata-rata 4 meter (standar deviasi 0,5), dan persistensi rata-rata 0,55 (standar deviasi 0,3). Properti mekanik pada *joint 2* menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dengan kohesi 0,037 MPa, sudut geser dalam $39,25^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 Mpa.

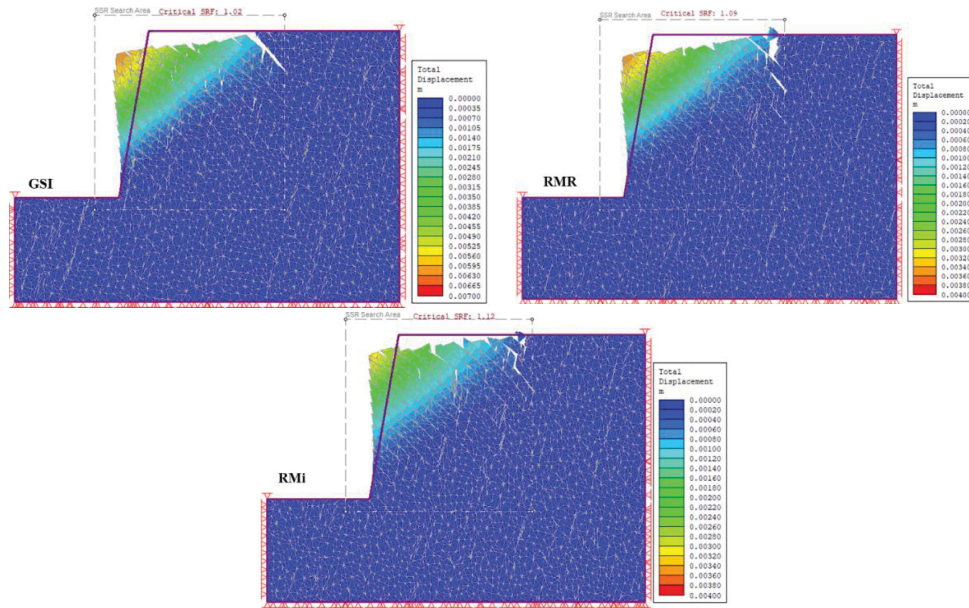


Gambar IV.13 Model lereng pada STA 03, *joint 1* ditunjukkan dengan warna kuning dan *joint 2* warna hijau.

Parameter properti keteknikan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb yang meliputi kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), kuat tarik (σ_t), nisbah Poisson (ν), dan modulus deformasi (E_m) dari setiap klasifikasi massa batuan yang diinput ke dalam model lereng dapat dilihat pada Tabel IV.2. Berat isi (γ) dari lereng STA 03 yaitu $25,4 \text{ kN/m}^3$. Analisis pada model ini dilakukan dengan asumsi kondisi *elastic-plastic*, yaitu kurva dari nilai kuat massa batuan pada saat mengalami keruntuhan akan bersifat linear, oleh karena itu nilai reduksi dari kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tarik memiliki nilai yang sama. Pada model ini dilakukan juga analisis SSR (*Shear Strength Reduction*) untuk mereduksi nilai kuat massa batuan terhadap deformasi yang terjadi pada lereng (Gambar IV.14).

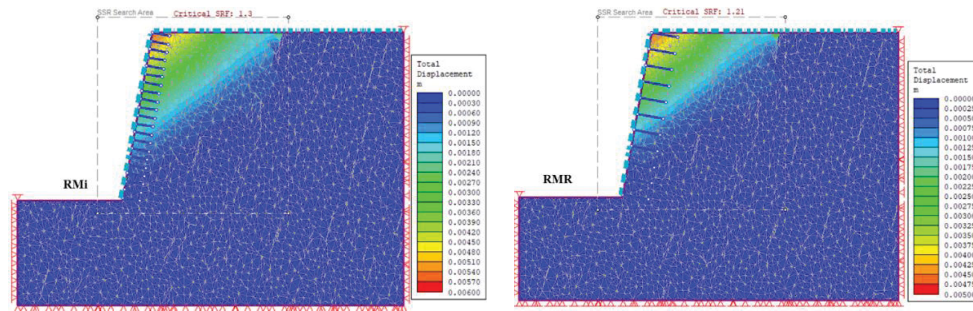
Berdasarkan analisis dengan metode elemen hingga, didapatkan nilai faktor keamanan lereng STA 03 pada klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMi sebesar 1,02, 1,09, dan 1,13 dengan besar nilai perpindahan total sebesar 2,3 mm, 2,8 mm, dan 2,9 mm. Dari ketiga klasifikasi massa batuan, hanya klasifikasi RMi

yang menghasilkan nilai di atas ambang batas $FK > 1,1$ (SNI 8460, 2016), sedangkan klasifikasi GSI dan RMR di bawah nilai ambang, sehingga dapat diindikasikan bahwa lereng pada STA 03 dalam keadaan stabil pada klasifikasi RMI dan kurang stabil pada klasifikasi GSI dan RMR.



Gambar IV.14 Model deformasi longsoran guling STA 03.

Rekomendasi penyangga pada setiap klasifikasi massa batuan di STA 03 dapat diterapkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Rekomendasi penyangga dari klasifikasi RMR dan RMI (Tabel III.10) akan digunakan pada analisis ini, sedangkan klasifikasi GSI tidak digunakan karena tidak memiliki rekomendasi sistem penyangga. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan rekomendasi penyangga, didapatkan faktor keamanan pada klasifikasi RMR dan RMI sebesar 1,21 dan 1,3 dengan nilai total perpindahan sebesar 3 mm dan 3 mm. Rekomendasi penyangga pada sistem RMI relatif cukup baik di lereng STA 03 dengan nilai FK yang dihasilkan lebih tinggi dari sistem penyangga RMR (Gambar IV.15).



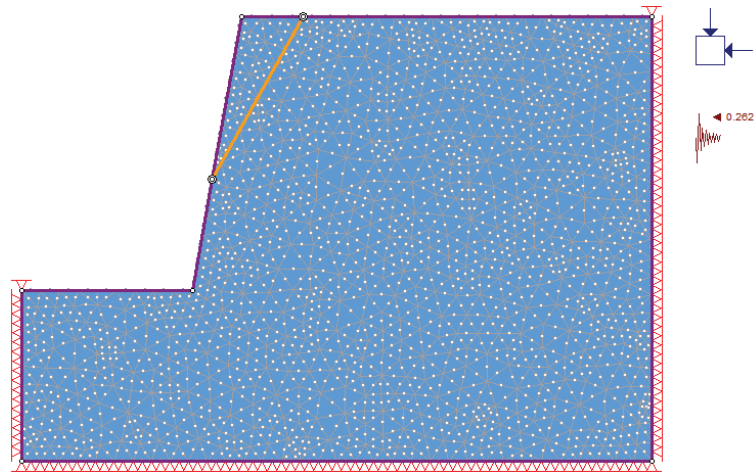
Gambar IV.15 Model sistem penyangga pada longsor guling STA 03.

IV.3.3 Prosedur Analisis Longsoran Baji

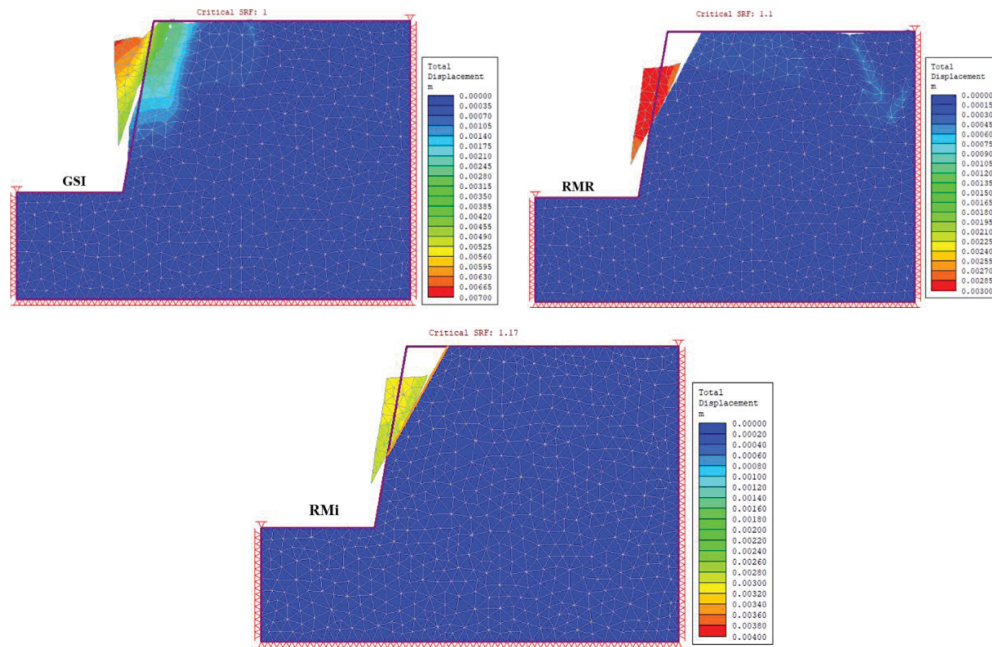
Analisis kestabilan lereng pada longsoran baji dengan metode elemen hingga dilakukan setelah pembuatan model lereng terpenuhi. Adapun input parameter properti keteknikan dilakukan terhadap material massa batuan pada model lereng dan properti mekanik pada diskontinuitas *joint 1* dan *joint 2* yang merupakan diskontinuitas pembentuk longsoran baji, kemudian setelah semua input parameter lengkap dilakukan proses komputasi oleh perangkat lunak untuk mendapatkan nilai faktor keamanan.

IV.3.3.1 Kestabilan lereng STA 04

Model lereng STA 04 memiliki geometri dengan tinggi lereng 40 meter dan kemiringan muka lereng 75° (Gambar IV.16). Model STA 04 ini terdapat dua set diskontinuitas (*joint 1* dan *joint 2*) yang mempengaruhi longsoran baji. Untuk model longsoran baji ini akan digunakan asumsi garis perpotongan dari dua diskontinuitas tersebut terhadap muka lereng STA 04 dengan besar sudut 61° . Garis perpotongan tersebut diasumsikan sama dengan properti mekanik pada *joint 1* dengan kohesi 0,034 MPa, sudut geser dalam $29,25^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, serta kuat tarik diasumsikan 0 MPa.



Gambar IV.16 Model lereng pada STA 04.



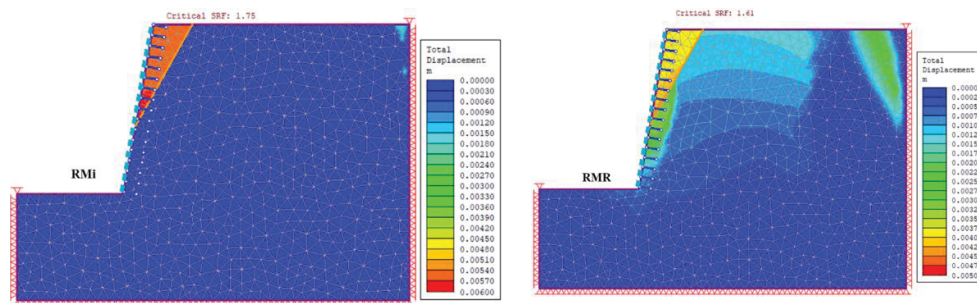
Gambar IV.17 Model deformasi longsoraji pada STA 04.

Parameter properti keteknikan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb yang meliputi kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), kuat tarik (σ_t), nisbah Poisson (ν), dan modulus deformasi (E_m) dari setiap klasifikasi massa batuan yang diinput ke dalam model lereng dapat dilihat pada Tabel IV.2. Berat isi (γ) dari lereng STA 04 yaitu $26,4 \text{ kN/m}^3$. Analisis pada model ini dilakukan dengan asumsi kondisi *elastic-plastic*, yaitu kurva dari nilai kuat massa batuan pada saat mengalami keruntuhan akan

bersifat linear, oleh karena itu nilai reduksi dari kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tarik memiliki nilai yang sama. Pada model ini dilakukan juga analisis SSR (*Shear Strength Reduction*) untuk mereduksi nilai kuat massa batuan terhadap deformasi yang terjadi pada lereng (Gambar IV.17).

Berdasarkan analisis dengan metode elemen hingga, didapatkan nilai faktor keamanan lereng STA 04 pada klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMI sebesar 0,995, 1,1, dan 1,17 dengan besar nilai perpindahan total sebesar 5 mm, 6 mm, dan 3 mm. Dari ketiga klasifikasi massa batuan, hanya klasifikasi RMR dan RMI yang menghasilkan nilai di atas ambang batas $FK \geq 1,1$ (SNI 8460, 2016), sedangkan klasifikasi GSI di bawah nilai ambang, sehingga dapat diindikasikan bahwa lereng pada STA 04 dalam keadaan stabil pada klasifikasi RMR dan RMI dan tidak stabil pada klasifikasi GSI.

Rekomendasi penyangga pada setiap klasifikasi massa batuan di STA 04 dapat diterapkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Rekomendasi penyangga dari klasifikasi RMR dan RMI (Tabel III.10) akan digunakan pada analisis ini, sedangkan klasifikasi GSI tidak digunakan karena tidak memiliki rekomendasi sistem penyangga. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan rekomendasi penyangga, didapatkan faktor keamanan pada klasifikasi RMR dan RMI sebesar 1,61 dan 1,76 dengan nilai total perpindahan sebesar 3 mm dan 2 mm. Rekomendasi penyangga pada sistem RMI relatif cukup baik di lereng STA 04 dengan nilai FK yang dihasilkan lebih tinggi dari sistem penyangga RMR (Gambar IV.18).

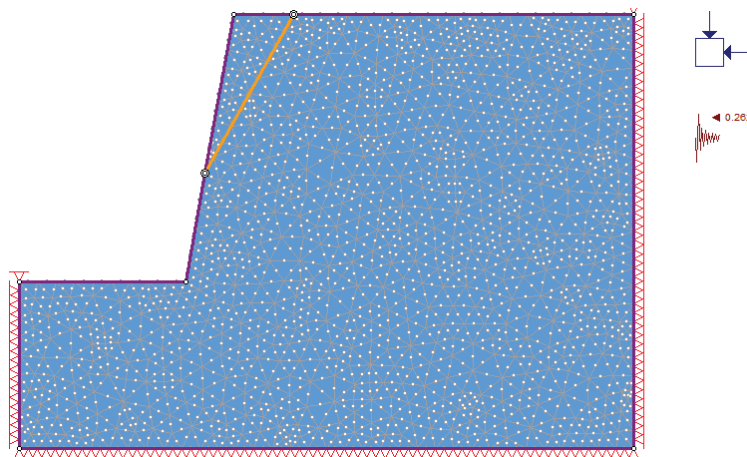


Gambar IV.18 Model sistem penyangga pada longsoraji STA 04.

IV.3.3.2 Kestabilan lereng STA 05

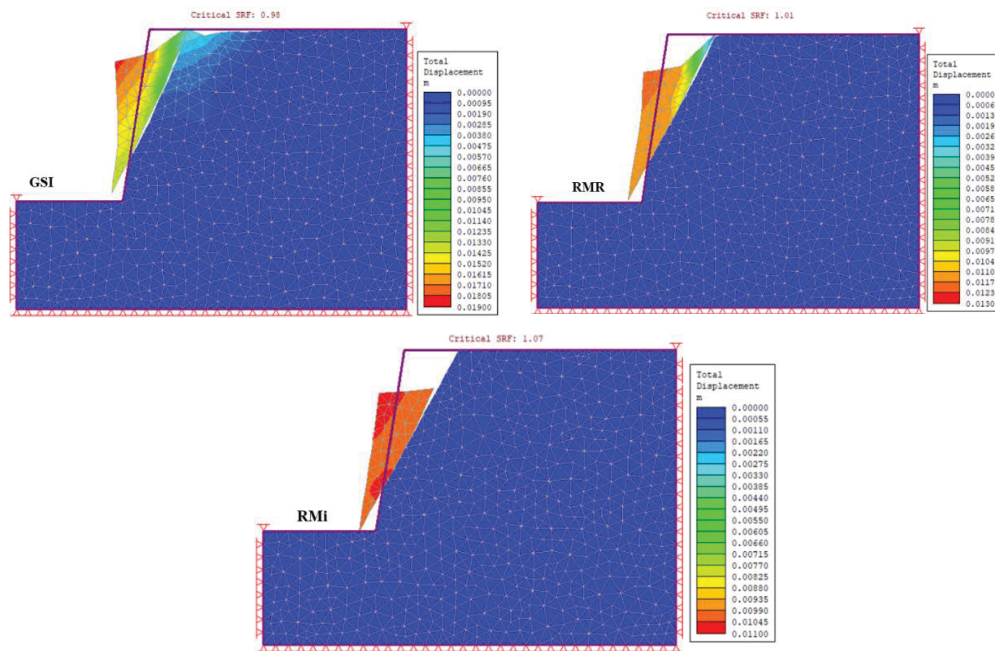
Model lereng STA 05 memiliki geometri dengan tinggi lereng 75 meter dan kemiringan muka lereng 80° (Gambar IV.19). Model STA 05 ini terdapat dua set diskontinuitas (*joint 1* dan *joint 2*) yang mempengaruhi longsoran baji. Untuk model longsoran baji ini akan digunakan asumsi garis perpotongan dari dua diskontinuitas tersebut terhadap muka lereng STA 05 dengan besar sudut 59° . Garis perpotongan tersebut diasumsikan sama dengan properti mekanik pada *joint 1* dengan kohesi 0,019 MPa, sudut geser dalam $27,18^\circ$, *normal stiffness* dan *shear stiffness* diasumsikan 100.000 MPa/m dan 10.000 MPa/m, dan kuat tarik diasumsikan 0 MPa.

Parameter properti keteknikan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb yang meliputi kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), kuat tarik (σ_t), nisbah Poisson (ν), dan modulus deformasi (E_m) dari setiap klasifikasi massa batuan yang diinput ke dalam model lereng dapat dilihat pada Tabel IV.2. Berat isi (γ) dari lereng STA 05 yaitu $26,8 \text{ kN/m}^3$. Analisis pada model ini dilakukan dengan asumsi kondisi *elastic-plastic*, yaitu kurva dari nilai kuat massa batuan pada saat mengalami keruntuhan akan bersifat linear, oleh karena itu nilai reduksi dari kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tarik memiliki nilai yang sama. Pada model ini dilakukan juga analisis SSR (*Shear Strength Reduction*) untuk mereduksi nilai kuat massa batuan terhadap deformasi yang terjadi pada lereng (Gambar IV.20).



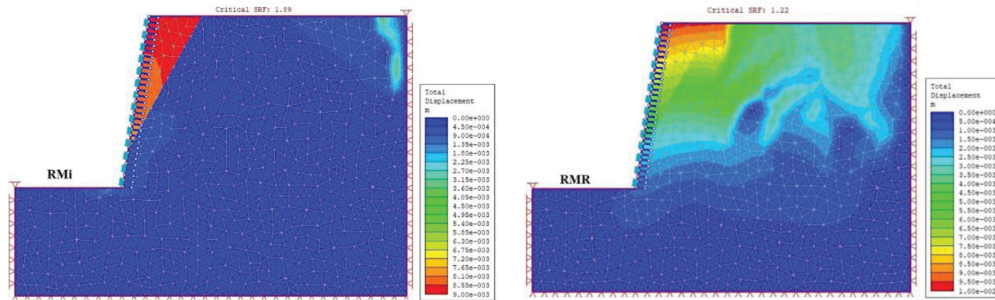
Gambar IV.19 Model lereng pada STA 05.

Berdasarkan analisis dengan metode elemen hingga, didapatkan nilai faktor keamanan lereng STA 05 pada klasifikasi massa batuan GSI, RMR, dan RMI sebesar 0,98, 1,01, dan 1,07 dengan besar nilai perpindahan total sebesar 18 mm, 12 mm, dan 10 mm. Dari ketiga klasifikasi massa batuan tersebut tidak ada nilai faktor keamanan yang melebihi ambang batas $FK \geq 1,1$ (SNI 8460, 2016), sehingga dapat diindikasikan STA 05 berada pada kondisi tidak stabil dan membutuhkan perkuatan lereng.



Gambar IV.20 Model deformasi longsoran baji STA 05.

Rekomendasi penyangga pada setiap klasifikasi massa batuan di STA 05 dapat diterapkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Rekomendasi penyangga dari klasifikasi RMR dan RMI (Tabel III.10) akan digunakan pada analisis ini, sedangkan klasifikasi GSI tidak digunakan karena tidak memiliki rekomendasi sistem penyangga. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan rekomendasi penyangga, didapatkan faktor keamanan pada klasifikasi RMR dan RMI sebesar 1,22 dan 1,89 dengan nilai total perpindahan sebesar 9 mm dan 8 mm. Rekomendasi penyangga pada sistem RMI relatif cukup baik di lereng STA 05 dengan nilai FK yang dihasilkan lebih tinggi dari sistem penyangga RMR (Gambar IV.21).



Gambar IV.21 Model sistem penyangga pada longsoran baji STA 05.

IV.4 Metode Kestimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

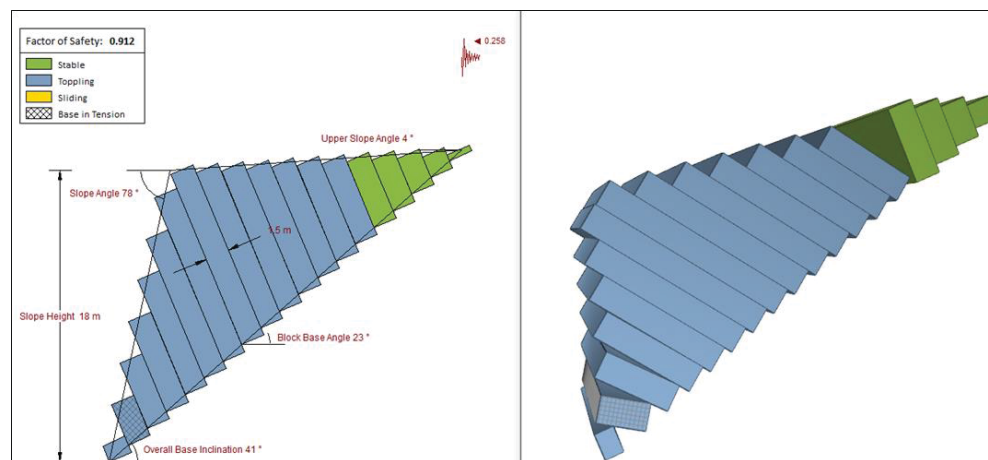
IV.4.1 Prosedur Analisis Longsoran Guling dan Faktor Keamanan

Pada analisis kestabilan lereng dengan tipe longsoran guling diperlukan geometri lereng batuan sesuai lokasi penelitian. Geometri lereng yang digunakan pada longsoran guling berdasarkan Goodman dan Bray (1976) dan Amini dkk. (2012) yang menggambarkan geometri lereng berbentuk kolom-kolom blok batuan yang akan saling terguling saat tegangan tarik maksimum melebihi kuat tariknya. Model geometri dari longsoran guling ini tersaji pada perangkat lunak *RocTopple* dari *student trial license Rocscience* dengan model analisis yang digunakan kesetimbangan batas. Untuk dapat menampilkan keadaan sebenarnya dari lokasi penelitian maka model yang dipilih berupa *block-flexural toppling* pada STA 01, STA 02, dan STA 03.

Parameter yang digunakan dalam analisis ini di antaranya berupa geometri lereng, berat isi (γ), kuat geser diskontinuitas, spasi diskontinuitas dari *toppling joint*, kekuatan massa batuan, dan koefisien seismik. Kuat geser diskontinuitas berupa kohesi *toppling joint* dan sudut geser dalam *toppling joint*. Istilah *toppling joint* merupakan diskontinuitas yang menyebabkan longsoran guling pada model lereng dengan orientasi diskontinuitas tegak lurus terhadap muka lereng. Kekuatan massa batuan yang diinput berupa data kohesi massa batuan, sudut geser massa batuan, dan kuat tarik massa batuan. Parameter tersebut diinput dalam model analisis kesetimbangan batas untuk mendapatkan nilai FK dengan menggunakan analisis deterministik dan probabilitas longsoran (PoF) dengan analisis probabilistik.

Pada analisis kesetimbangan batas dengan perangkat lunak *RocTopple* menggunakan metode deterministik akan diperoleh nilai faktor keamanan dari setiap lereng batuan berdasarkan hasil geometri lereng dan parameter yang telah disebutkan. Rekapitulasi perhitungan faktor keamanan pada STA 01, STA 02, dan STA 03 disajikan pada Gambar IV.22-24.

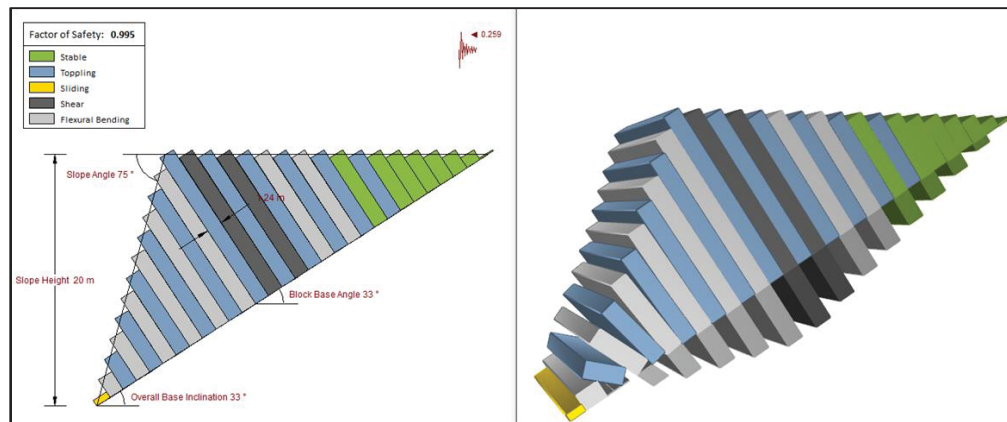
Lereng STA 01 memiliki geometri dengan tinggi 18 meter dan panjang sekitar 140 meter, arah muka lereng N285°E, kemiringan lereng 78°, *overall base inclination* 41°, spasi diskontinuitas *toppling* 1,5 meter, *toppling joint dip* 67°, berat isi batuan 26,2 kN/m³, dan koefisien seismik (K_h) 0,258. Nilai kohesi pada diskontinuitas pada *toppling joint* yaitu 0,029 MPa dengan sudut geser dalam *toppling* 31,04°. Parameter pada kekuatan massa batuan yang digunakan yaitu kohesi 0,6 MPa dengan sudut geser dalam 52° dan kuat tarik sebesar 0,253 MPa. Berdasarkan parameter tersebut dihasilkan nilai faktor keamanan lereng STA 01 sebesar 0,912 dan berada di bawah nilai ambang batas $FK = 1,1$ dan mengindikasikan kondisi lereng tidak stabil dengan gaya penahan lebih kecil daripada gaya penggerak. Pada model longsoran guling pada Gambar IV.22 terdapat 14 kolom blok batuan yang berpotensi terjadi longsoran guling, sedangkan 5 kolom blok batuan dalam keadaan stabil di bagian belakang lereng.



Gambar IV.22 Model longsoran guling STA 01.

Lereng STA 02 memiliki geometri dengan tinggi 20 meter dan panjang sekitar 100 meter, arah muka lereng N140°E, kemiringan lereng 75°, *overall base inclination* 33°, spasi diskontinuitas *toppling* 1,2 meter, *toppling joint dip* 57°, berat isi batuan

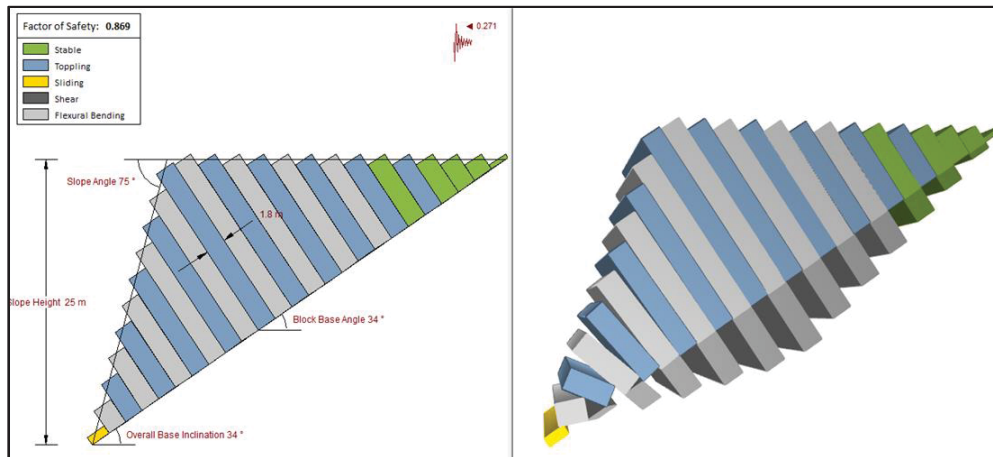
27,1 kN/m³, dan koefisien seismik (K_h) 0,259. Nilai kohesi pada diskontinuitas pada *toppling joint* yaitu 0,028 MPa dengan sudut geser dalam *toppling* 32,21°. Parameter pada kekuatan massa batuan yang digunakan yaitu kohesi 0,46 MPa dengan sudut geser dalam 51° dan kuat tarik sebesar 0,16MPa. Berdasarkan parameter tersebut dihasilkan nilai faktor keamanan lereng STA 02 sebesar 0,995 dan berada di bawah nilai ambang batas $FK = 1,1$ dan mengindikasikan kondisi lereng tidak stabil dengan gaya penahan lebih kecil daripada gaya penggerak. Dari model longsor guling pada Gambar IV.23 terdapat 11 kolom blok batuan yang berpotensi terjadi longsor guling, 1 blok berpotensi *sliding*, 8 kolom blok mengalami *flexural bending*, 2 blok mengalami *shear*, dan 7 kolom blok batuan dalam keadaan stabil di bagian belakang lereng.



Gambar IV.23 Model longsor guling STA 02.

Lereng STA 03 memiliki geometri dengan tinggi 25 meter dan panjang sekitar 185 meter, arah muka lereng N175°E, kemiringan lereng 80°, *overall base inclination* 34°, spasi diskontinuitas *toppling* 1.5 meter, *toppling joint dip* 56°, berat isi batuan 25,4 kN/m³, dan koefisien seismik (K_h) 0,271. Nilai kohesi pada diskontinuitas pada *toppling joint* yaitu 0,031 MPa dengan sudut geser dalam *toppling* 36,86°. Parameter pada kekuatan massa batuan yang digunakan yaitu kohesi 0.2 MPa dengan sudut geser dalam 51° dan kuat tarik sebesar 0,073 MPa. Berdasarkan parameter tersebut dihasilkan nilai faktor keamanan lereng STA 03 sebesar 0,869 dan berada di bawah nilai ambang batas $FK = 1,1$ dan mengindikasikan kondisi lereng tidak stabil dengan gaya penahan lebih kecil daripada gaya penggerak. Dari

model longsoran guling pada Gambar IV.24 terdapat 10 kolom blok batuan yang berpotensi terjadi longsoran guling, 1 blok berpotensi *sliding*, 9 kolom blok mengalami *flexural bending*, dan 5 kolom blok batuan dalam keadaan stabil di bagian belakang lereng.



Gambar IV.24 Model longsoran guling STA 03.

IV.4.2 Prosedur Analisis Longsoran Baji dan Faktor Keamanan

Dalam analisis kestabilan lereng diperlukan bentuk geometri lereng batuan yang sesuai. Geometri lereng pada longsoran baji pada penelitian ini geometri lereng berdasarkan Kovari dan Fritz (1976) menggambarkan blok batuan yang dihasilkan dari perpotongan bidang diskontinuitas bidang gelincir pada 2 set diskontinuitas. Model geometri ini tersaji pada perangkat lunak *Swedge* dari *student trial license Rocscience* dengan model analisis yang digunakan kesetimbangan batas.

Terdapat beberapa input parameter pada analisis kesetimbangan batas selain geometri, yaitu kuat geser diskontinuitas, berat isi (γ), dan koefisien seismik. Data kuat geser diskontinuitas berupa nilai kohesi dan sudut geser dalam dari dua set diskontinuitas yang membentuk longsoran baji. Nilai koefisien seismik yang diinput merupakan koefisien seismik horizontal seperti pada pembahasan subbab III.1.4.

Pada analisis kesetimbangan di perangkat lunak *Swedge* ini dapat digunakan metode deterministik untuk menentukan nilai faktor keamanan (FK) dan metode

probabilistik untuk menentukan probabilitas longsoran (PoF). Model geometri lereng yang digunakan adalah model *wedge* dengan asumsi model longsoran berbentuk segitiga pada setiap bidang perpotongan dari dua set diskontinuitas.

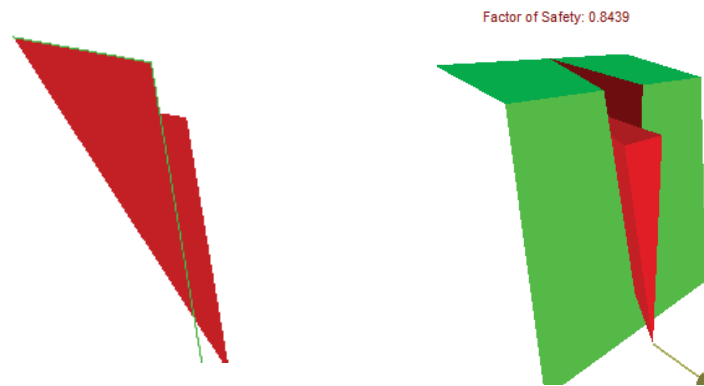
Pada analisis kesetimbangan batas dengan perangkat lunak *Swedge* dengan menggunakan metode deterministik akan diperoleh nilai faktor keamanan dari setiap lereng batuan berdasarkan hasil geometri lereng dan kuat geser diskontinuitas beserta gaya pemberat dalam model. Rekapitulasi perhitungan faktor keamanan pada STA 04 dan STA 05 disajikan pada Gambar IV.25 dan Gambar IV.26.

Lereng STA 04 memiliki geometri dengan tinggi 40 meter dan panjang sekitar 100 m, arah muka lereng N343°E, kemiringan lereng 75°, berat isi batuan 26,4 kN/m³, dan koefisien seismik (K_h) 0,2615. Berdasarkan analisisnya, volume baji yang dihasilkan pada lereng ini sebesar 1148,12 m³ dengan berat 30,19 MN. Gaya yang terjadi pada *joint 1* sebesar 9,144 MN dengan tekanan 0,032 MPa dan kuat geser 0,047 MPa. Pada *joint 2* menghasilkan gaya sebesar 9,513 dengan tekanan 0,027 MPa dan kuat geser 0,049 MPa. Gaya penggerak pada lereng ini sebesar 29,96 MN, sedangkan gaya penahan yang terbentuk sebesar 31,083 MN. Faktor keamanan yang dihasilkan sebesar 1,0372 dan berada sedikit di bawah ambang batas FK = 1,1 dan mengindikasikan kondisi lereng kurang stabil dengan gaya penahan lebih kecil daripada gaya penggerak.

Lereng STA 05 memiliki geometri dengan tinggi 75 meter dan panjang sekitar 215 m, arah muka lereng N175°E, kemiringan lereng 80°, berat isi batuan 26,8 kN/m³, dan koefisien seismik (K_h) 0,2675. Berdasarkan analisisnya, volume baji yang dihasilkan pada lereng ini sebesar 6222,49 m³ dengan berat 163,65 MN. Gaya yang terjadi pada *joint 1* sebesar 82,864 MN dengan tekanan 0,074 MPa dan kuat geser 0,057 MPa. Pada *joint 2* menghasilkan gaya sebesar 85.706 dengan tekanan 0.077 MPa dan kuat geser 0,064 MPa. Gaya penggerak pada lereng ini sebesar 160,192 MN, sedangkan gaya penahan yang terbentuk sebesar 135,190 MN. Faktor keamanan yang dihasilkan sebesar 0,8439 dan berada jauh di bawah ambang batas FK = 1,1 dan mengindikasikan kondisi lereng tidak stabil dengan gaya penahan lebih kecil daripada gaya penggerak.



Gambar IV.25 Model longsoran baji STA 04.



Gambar IV. 26 Model longsoran baji STA 05.

IV.4.3 Probabilitas Longsor (PoF) dengan Simulasi Monte Carlo

Pada perhitungan probabilitas longsor secara analitik, kuat geser diskontinuitas yang berupa kohesi dan sudut geser dalam dianggap tidak pasti dengan nilai rentang variasi berdasarkan distribusi normal. Untuk menghasilkan nilai acak digunakan metode Monte Carlo untuk mensimulasikan nilai-nilai acak dari kohesi dan sudut geser dalam. Pemilihan nilai kovarian sebesar 0,25 berdasarkan Hoek (2007) dengan asumsi variasi kohesi dan sudut geser dalam sedang menuju sangat acak. Metode probabilistik digunakan pada penerapan stabilitas lereng dari data karakteristik massa batuan (Hoek, 2007). Distribusi yang digunakan diasumsikan merupakan distribusi normal karena dianggap sudah dilakukan optimasi data. Metode *sampling* yang digunakan dengan Monte Carlo yang sangat tepat untuk menyelesaikan ketidakpastian pada faktor keamanan hingga probabilitas longsor

yang didefinisikan. Hasil simulasi Monte Carlo pada kuat geser set diskontinuitas yang mempengaruhi longsoran guling dan baji disajikan pada Tabel IV.4 dan Tabel IV.5. Pada kedua tabel tersebut disajikan nilai acak dari 5000 sampel dengan distribusi normal yang diperoleh terhadap nilai kohesi dan sudut geser dalam.

Tabel IV.4 Rekapitulasi hasil simulasi Monte Carlo pada lokasi lereng berpotensi longsoran guling

Lereng	Parameter Probabilistik	Distribusi	Rata-rata	Standar Deviasi	Relative Minimum	Relative Maximum
STA 01	Sudut Geser <i>Toppling Joint</i> ($^{\circ}$)	Normal	30.26	5	15	15
	Kohesi <i>Toppling Joint</i> (MPa)	Normal	0.026	0.002	0.006	0.006
	<i>Base Friction Angle</i> ($^{\circ}$)	Normal	52	5	15	15
	<i>Base Cohesion</i> (MPa)	Normal	0.6	0.165	0.495	0.495
	Kemiringan Lereng ($^{\circ}$)	Normal	78	3.3	9.9	9.9
	Tinggi Lereng (m)	Normal	18	1.6	4.8	4.8
	<i>Toppling Joint Dip</i> ($^{\circ}$)	Normal	67	5.83	17.49	17.49
	<i>Toppling Joint Spacing</i> (m)	Normal	1.5	0.3	0.9	0.9
STA 02	Sudut Geser <i>Toppling Joint</i> ($^{\circ}$)	Normal	0.022	0.002	0.006	0.006
	Kohesi <i>Toppling Joint</i> (MPa)	Normal	29	5	15	15
	<i>Base Friction Angle</i> ($^{\circ}$)	Normal	51	5	15	15
	<i>Base Cohesion</i> (MPa)	Normal	0.46	0.1	0.3	0.3
	Kemiringan Lereng ($^{\circ}$)	Normal	75	3.3	9	9
	Tinggi Lereng (m)	Normal	20	1.6	4.8	4.8
	<i>Toppling Joint Dip</i> ($^{\circ}$)	Normal	57	5.83	17.49	17.49
	<i>Toppling Joint Spacing</i> (m)	Normal	1.24	0.3	0.9	0.9
STA 03	Sudut Geser <i>Toppling Joint</i> ($^{\circ}$)	Normal	32.52	5	15	15
	Kohesi <i>Toppling Joint</i> (MPa)	Normal	0.019	0.002	0.006	0.006
	<i>Base Friction Angle</i> ($^{\circ}$)	Normal	38.43	5	15	15
	<i>Base Cohesion</i> (MPa)	Normal	0.031	0.01	0.03	0.03
	Kemiringan Lereng ($^{\circ}$)	Normal	80	3	9	9
	Tinggi Lereng (m)	Normal	25	1.6	4.8	4.8
	<i>Toppling Joint Dip</i> ($^{\circ}$)	Normal	69	5.83	17.49	17.49
	<i>Toppling Joint Spacing</i> (m)	Normal	1.8	0.3	0.9	0.9

Penggunaan simulasi Monte Carlo bertujuan untuk dapat memiliki varian nilai acak dari kohesi dan sudut geser dalam dengan asumsi terdapat beberapa nilai. Ketidakpastian dari nilai parameter pada lokasi yang ditentukan memerlukan deskripsi nilai secara acak.

Parameter yang digunakan untuk menentukan probabilitas longsoran lereng batuan yaitu dengan menggunakan nilai rata-rata pada sifat mekanik diskontinuitas berupa kohesi dan sudut geser dalam melalui simulasi Monte Carlo. Hasil dari perhitungan analisis deterministik pada perangkat lunak *Swedge* dan *RocTopple* menghasilkan nilai faktor keamanan, sedangkan analisis probabilistik menghasilkan nilai probabilitas longsoran.

Berdasarkan nilai ambang batas nilai probabilitas longsoran Wyllie dan Mah (2005) sebesar 5%, lereng STA 01, STA 02, STA 03, STA 04, dan STA 05 jauh di bawah ambang batas dengan probabilitas masing-masing lokasi yaitu 59,7%, 53,8%, 86,9%, 34%, dan 64%. Oleh karena itu diperlukan upaya stabilisasi lereng di lokasi tersebut untuk mengurangi kemungkinan terjadinya longsoran.

Tabel IV. 5 Rekapitulasi hasil simulasi Monte Carlo pada lokasi lereng berpotensi longsoran baji

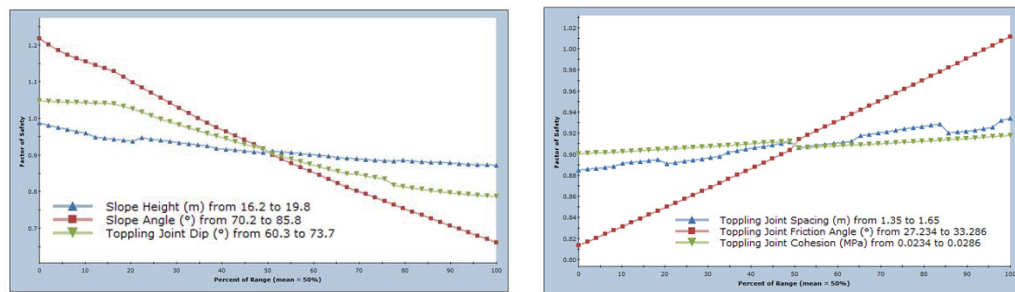
Lereng	Parameter Probabilistik	Distribusi	Rata-rata	Standar Deviasi	Relative Minimum	Relative Maximum
STA 04	Joint 1 Kohesi (MPa)	Normal	0.034	0.02	0.006	0.006
	Joint 1 Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)	Normal	29.52	5	15	15
	Joint 2 Kohesi (MPa)	Normal	0.03	0.02	0.006	0.006
	Joint 2 Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)	Normal	28.15	5	15	15
	Kemiringan Lereng ($^{\circ}$)	Normal	75	3	9	9
	Tinggi Lereng	Normal	45	1.6	4.8	4.8
	Arah Lereng ($^{\circ}$)	Normal	343	2	8	8
STA 05	Joint 1 Kohesi (MPa)	Normal	0.019	0.02	0.006	0.006
	Joint 1 Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)	Normal	27.18	5	15	15
	Joint 2 Kohesi (MPa)	Normal	0.022	0.02	0.006	0.006
	Joint 2 Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)	Normal	28.67	5	15	15
	Kemiringan Lereng ($^{\circ}$)	Normal	80	3	9	9
	Tinggi Lereng	Normal	75	1.6	4.8	4.8
	Arah Lereng ($^{\circ}$)	Normal	175	2	8	8

IV.4.4 Sensitivitas Data

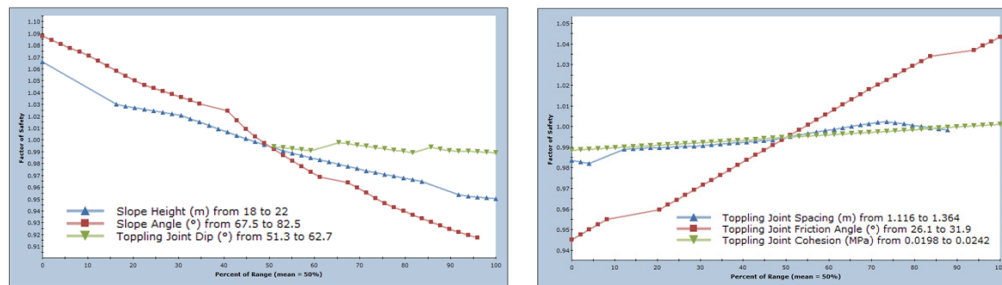
Analisis pada sensitivitas data dilakukan untuk melihat pengaruh data yang diinput pada perangkat lunak terhadap penurunan dan kenaikan nilai faktor keamanan. Parameter yang dianalisis di antaranya kohesi dan sudut geser dalam *joint 1* (c_1 dan ϕ_1) dan *joint 2* (c_2 dan ϕ_2), arah muka lereng, kemiringan lereng, dan tinggi lereng. Analisis ini berbentuk kurva yang menggambarkan hubungan persentase perubahan setiap parameter terhadap kenaikan nilai FK dari nilai rata-rata.

Lereng STA 01, STA 02, dan STA 03 dengan potensi longsoran guling memiliki pergerakan guling pada beberapa kolom blok batuan seperti pada Gambar IV.22-24. Penurunan nilai faktor keamanan pada longsoran guling dipengaruhi oleh beberapa faktor parameter yang signifikan, di antaranya kohesi *toppling joint* (c), sudut geser dalam *toppling joint* (ϕ), kemiringan lereng, dan *toppling joint dip* (Gambar IV.27-29). Kenaikan dari faktor keamanan pun akan sangat dikontrol oleh parameter tersebut.

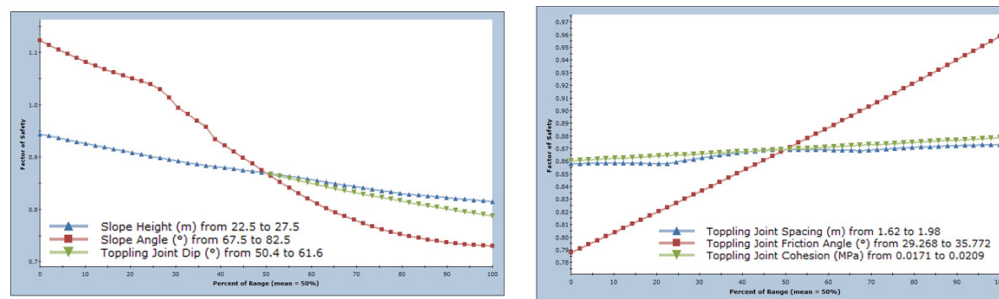
Pada lereng STA 04 dan STA 05 dengan potensi longsoran baji memiliki gerakan gelinciran yang didominasi oleh pergerakan di kedua bidang diskontinuitas sesuai pada Gambar IV.25-26. Penurunan nilai faktor keamanan dikontrol oleh penurunan nilai kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan kemiringan lereng (Gambar IV.30 dan Gambar IV.31). Hal ini berlaku sebaliknya, kenaikan pada faktor keamanan sangat dikontrol oleh tiga parameter tersebut.



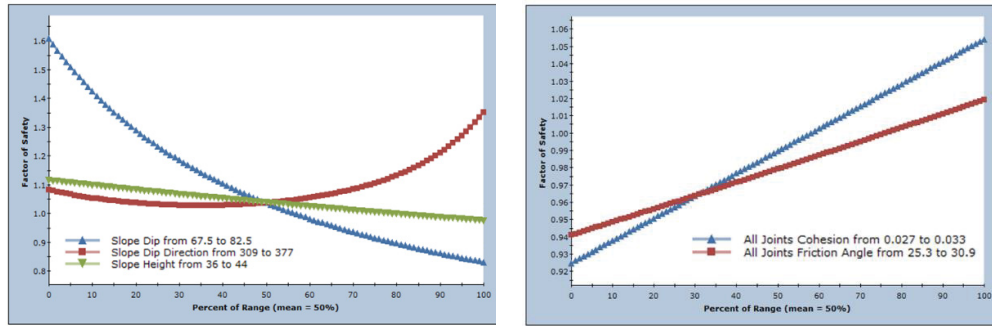
Gambar IV.27 Sensitivitas data pada longsoran guling STA 01.



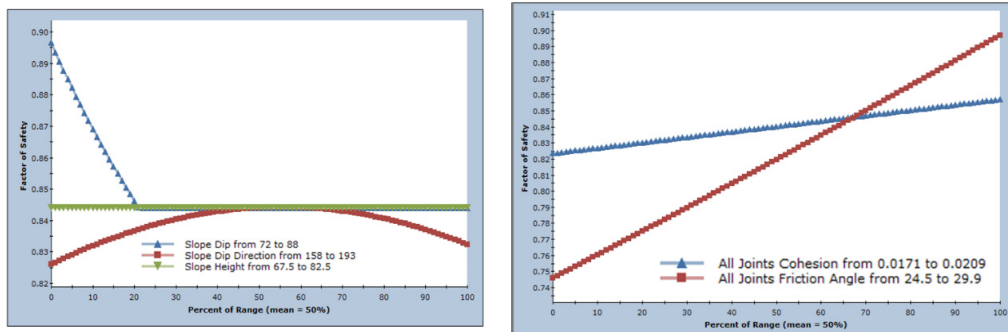
Gambar IV.28 Sensitivitas data pada longsoran guling STA 02.



Gambar IV.29 Sensitivitas data pada longsoran guling STA 03.



Gambar IV.30 Sensitivitas data pada longsoraji STA 04.



Gambar IV.31 Sensitivitas data pada longsoraji STA 05.