

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Data Teknis Lokasi Studi

Data teknis terkait lokasi penelitian adalah informasi fundamental yang digunakan sebagai panduan dalam perencanaan serta analisis pengamanan tebing sungai. Informasi tersebut mencakup kondisi geografis, topografi, geometri sungai, karakteristik tanah, dan keadaan eksisting tebing sungai di area investigasi. Adanya data teknis yang akurat sangat krusial untuk mencapai hasil perencanaan yang selaras dengan situasi lapangan dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.

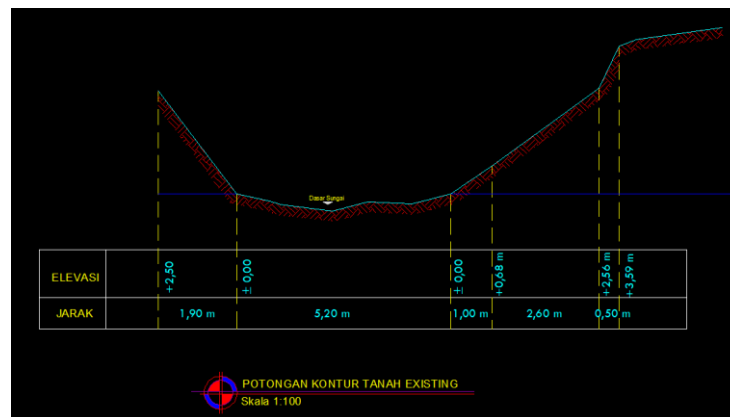
Tempat penelitian ini terletak di Desa Bulaklo, Kecamatan Balen, Kabupaten Bojonegoro, pada tebing Sungai/Kali Subang yang rentan terhadap kerusakan akibat erosi dan longsor tebing. Data yang digunakan diperoleh melalui survei lapangan, pengukuran topografi, dan hasil penyelidikan tanah yang selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak GeoStudio untuk menilai stabilitas tebing serta menentukan opsi penanganan yang tepat.

Penyampaian data teknis lokasi penelitian bertujuan untuk memberikan pemahaman menyeluruh mengenai kondisi eksisting di area penelitian sebagai landasan dalam proses analisis dan perencanaan pengamanan tebing tipe bronjong.

4.1.1 Sudut Lereng

Kestabilan suatu lereng alami sangat ditentukan oleh besarnya sudut kemiringan lereng terhadap bidang horizontal. Semakin besar sudut lereng, semakin kecil gaya penahan (geser) tanah terhadap gaya pendorong (gravitasi). Pada lokasi studi di tepi Sungai/Kali Subang, Desa Bulaklo, Kecamatan Balen, Kabupaten Bojonegoro, kondisi eksisting menunjukkan sudut lereng berkisar antara 35° hingga 40° dengan tinggi tebing mencapai 3,5 meter. Berdasarkan analisis awal menggunakan metode keseimbangan batas, sudut lereng tersebut masuk dalam kategori kritis hingga tidak stabil, terutama saat muka air tanah naik pada musim hujan. Tanah lempung kepasiran yang mendominasi lokasi memiliki kohesi rendah ($c = 12 \text{ kPa}$) sehingga ketahanan terhadap gaya geser sangat bergantung pada sudut geser dalam ($\phi = 18^\circ$). Ketika sudut lereng melebihi sudut geser dalam tanah, maka terjadi ketidakseimbangan yang memicu bidang longsor, biasanya dimulai dari puncak tebing menuju ke kaki lereng. Oleh karena itu, upaya

perbaikan sudut lereng melalui rekayasa teknis seperti pemasangan bronjong menjadi keniscayaan agar faktor keamanan (FK) dapat ditingkatkan hingga di atas 1,5 sesuai standar keamanan lereng permanen.

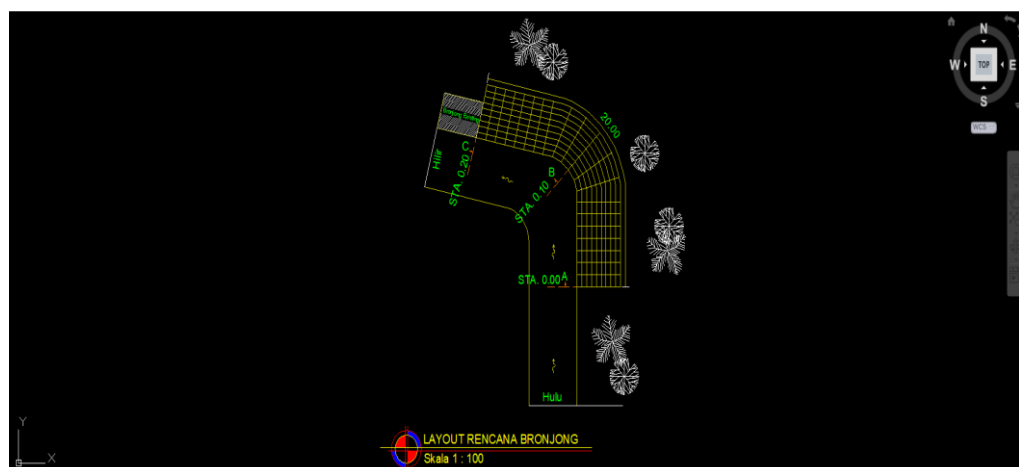


Gambar 4.1 *elevasi tanah existing pada pengaplikasian AutoCad*

Sumber : Hasil Analisis Peneliti (2026)

4.1.2 Layout Lokasi

Gambar menunjukkan layout rencana pemasangan bronjong pada tikungan sungai dengan panjang penanganan 20 meter, dimulai dari STA 0+00 (Titik A) hingga STA 0+20 (Titik C). Pemasangan bronjong mengikuti geometri tikungan sungai pada sisi luar tikungan yang merupakan lokasi dengan potensi gerusan dan erosi paling besar akibat perubahan arah aliran. Pada STA 0+10 (Titik B), bronjong dipasang mengikuti lengkungan sungai untuk menjaga kesinambungan perlindungan tebing, sedangkan pada STA 0+20 (Titik C), konstruksi bronjong dihubungkan dengan bronjong eksisting sehingga membentuk sistem pengaman tebing yang menyatu.



Gambar 4.2 *Layout Lokasi Bronjong pada pengaplikasian AutoCad*

Sumber : Hasil Analisis Peneliti (2026)

4.2 Hasil Uji Data Tanah

Hasil pengujian dilakukan dilaboratorium universitas bojonegoro untuk menemukan data sifat fisik tanah dan mekanik tanah, data tersebut di input sebagai parameter tanah pada analisis stabilitas lereng pada aplikasi GeoStudio

4.2.1 Uji perhitungan direct shear

Tabel 4.1 Hasil perhitungan direct shear sampel atas 2 meter

No	Contoh Uji	Satuan	1	2	3
1	Nomor Ring	(gr)			
2	Berat Contoh + Ring	(gr)	205.46	207.47	206.03
3	Berat Ring	(gr)	86.87	86.87	86.87
4	Berat Tanah Basah	(gr)	118.59	120.60	119.16
5	Tinggi Contoh	(cm)	1.964	1.964	1.964
6	Diameter Contoh	(cm)	6.304	6.304	6.304
7	Luas Sample	(cm ²)	31.20	31.20	31.20
8	Isi Contoh	(cm ³)	61.27	61.27	61.27
9	Berat Isi Basah	(gr/cm ³)	1.94	1.97	1.94
10	Kadar Air. W	(%)	0.41	0.41	0.39
11	Berat Isi Kering	(gr/cm ³)	1.38	1.39	1.40
	Rata-rata Berat Isi Basah Benda Uji	(gr/cm ³)	1.94		
	Rata-rata Kadar Air Benda Uji	(%)	40.38%		

Sumber : *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Berdasarkan Tabel 4.1, hasil pengujian Direct Shear Test pada sampel tanah kedalaman 2 meter menunjukkan bahwa benda uji memiliki dimensi yang seragam, yaitu tinggi 1,964 cm dan diameter 6,304 cm. Nilai rata-rata berat isi basah diperoleh sebesar 1,94 gr/cm³ dengan kadar air rata-rata sebesar 40,38%. Selain itu, berat isi kering berkisar antara 1,38–1,40 gr/cm³ yang menunjukkan kondisi kepadatan tanah relatif homogen. Data karakteristik fisik tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis parameter kuat geser tanah, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

Tabel 4.2 Hasil perhitungan direct shear sebelum sampel atas 2 meter

Hasil sebelum pengujian					
No	Nomor Cawan	Satuan	D2	4.95	N 19
1	Massa Tanah Basah + Cawan	(gr)	50.36	28.24	34.63
2	Massa Tanah Kering + Cawan	(gr)	39.55	24.43	29.25
3	Massa Air	(gr)	10.81	3.81	5.38
4	Massa Cawan	(gr)	23.86	14.06	14.98
5	Massa Tanah Kering	(gr)	15.69	10.37	14.27
6	Kadar Air	(%)	68.90	36.74	37.70
7	Rata-rata Kadar Air	(%)	47.78		

Sumber : *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Tabel 4.3 Hasil perhitungan direct shear sesudah sampel atas 2 meter

Hasil sesudah pengujian					
No	Nomor Cawan	Satuan	32	C3	N1 41
1	Massa Tanah Basah + Cawan	(gr)	76.98	63.92	70.49
2	Massa Tanah Kering + Cawan	(gr)	61.47	48.83	54.97
3	Massa Air	(gr)	15.51	15.09	15.52
4	Massa Cawan	(gr)	23.32	12.38	15.26
5	Massa Tanah Kering	(gr)	38.15	36.45	39.71
6	Kadar Air	(%)	40.66	41.40	39.08
7	Rata-rata Kadar Air	(%)	40.38		

Sumber : *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Berdasarkan Tabel hasil perhitungan kadar air sampel tanah pada kedalaman 2 meter menunjukkan bahwa rata-rata kadar air sebelum pengujian sebesar 47,78%, sedangkan setelah pengujian sebesar 40,38%. Penurunan kadar air tersebut menunjukkan adanya berkurangnya kandungan air pada benda uji selama proses Direct Shear Test. Data kadar air sebelum dan sesudah pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan kondisi fisik tanah serta sebagai data pendukung dalam analisis parameter kuat geser tanah.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan direct shear sampel atas 2 meter

Nilai Kalibrasi : 0.003149341kg Sample 1 Atas

beban	N1	3	kg	N2	6	kg	N3	12	kg
beban	N1	0.03	KN	N2	0.06	KN	N3	0.12	KN
tegangan normal	σ_1	0.10	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	σ_2	0.19	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	σ_3	0.38	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
tegangan normal	σ_1	9.62	kPa	σ_2	19.23	kPa	σ_3	38.47	kPa
Pergeseran	Bacaan Proving Ring	Gaya Geser	Tegangan Geser	Bacaan Proving Ring	Gaya Geser	Tegangan Geser	Bacaan Proving Ring	Gaya Geser	Tegangan Geser
divisi	divisi	kN	kPa	Divisi	kN	kPa	divisi	kN	kPa
0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.00
50	3	0.01	3.03	6.5	0.02	6.6	10	0.0	10.10
100	6	0.02	6.06	8.5	0.03	8.6	13	0.0	13.12
150	7	0.02	7.07	9.2	0.03	9.3	15	0.0	15.14
200	7.8	0.02	7.87	10	0.03	10.1	16.2	0.1	16.35
250	8	0.03	8.08	10.5	0.03	10.6	17.5	0.1	17.67
300	8.9	0.03	8.98	11	0.03	11.1	19	0.1	19.18
350	9	0.03	9.09	12	0.04	12.1	20	0.1	20.19
400	9	0.03	9.09	13	0.04	13.1	21	0.1	21.20
450	9	0.03	9.09	14	0.04	14.1	21.8	0.1	22.01
500	8	0.03	8.08	14.8	0.05	14.9	22	0.1	22.21
550	7	0.02	7.07	15	0.05	15.1	22	0.1	22.21

Sumber : Hasil Analisis Peneliti (2026)

Berdasarkan Tabel 4.4 tersebut menyajikan hasil pengujian Direct Shear Test pada Sampel 1 bagian atas dengan tiga variasi beban normal, yaitu 3 kg, 6 kg, dan 12 kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar beban normal yang diberikan, semakin besar pula tegangan geser maksimum yang dihasilkan, yaitu berturut-turut sebesar 9,09 kPa, 15,10 kPa, dan 22,21 kPa. Data ini selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter kuat geser tanah, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

Sample 1 Atas

Tabel 4.5 Hasil perhitungan direct shear sampel atas 2 meter

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Kohesi	5.55	Kpa
2	Sudut Geser Dalam	23.86	
3	Berat Isi Basah	1.95	gr/cm ³
4	Kadar Air	0.40	%

Sumber : *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

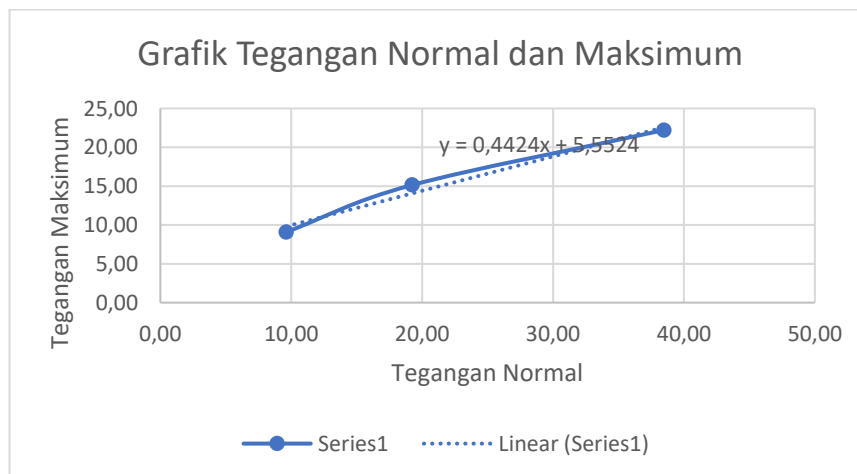
Tabel tersebut menyajikan parameter kuat geser dan sifat fisik tanah pada Sampel 1 bagian atas. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai kohesi sebesar 5,55 kPa, sudut geser dalam sebesar 23,86°, berat isi basah sebesar 1,95 gr/cm³, dan kadar air sebesar 0,40%. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai data dasar dalam analisis daya dukung dan stabilitas tanah pada perencanaan struktur.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan direct shear sampel atas 2 meter

Tegangan normal	Tegangan Maksimum
9.62	9.09
19.23	15.1
38.47	22.21

Sumber : *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Tabel tersebut menunjukkan hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser maksimum hasil pengujian Direct Shear Test. Seiring meningkatnya tegangan normal dari 9,62 kPa menjadi 38,47 kPa, nilai tegangan geser maksimum juga meningkat dari 9,09 kPa menjadi 22,21 kPa. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan tegangan normal berpengaruh terhadap meningkatnya kuat geser tanah, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ).



Gambar 4.3: *Grafik Tegangan Normal dan Maksimum Sampel 1*

Sumber: *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Grafik menunjukkan bahwa tegangan geser maksimum meningkat seiring bertambahnya tegangan normal. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y=0,4424x+5,5524$, dengan nilai kohesi (c) sebesar 5,55 kPa, sedangkan kemiringan garis digunakan untuk menentukan sudut geser dalam (ϕ). Hasil ini menunjukkan bahwa tanah memiliki kuat geser yang semakin besar dengan meningkatnya tegangan normal yang bekerja.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan direct shear Sampel Bawah 2 meter

No	Contoh Uji	Satuan	1	2	3
1	Nomor Ring	(gr)			
2	Berat Contoh + Ring	(gr)	206.96	201.17	208.84
3	Berat Ring	(gr)	86.87	86.87	86.87
4	Berat Tanah Basah	(gr)	120.09	114.3	121.97
5	Tinggi Contoh	(cm)	1.964	1.964	1.964
6	Diameter Contoh	(cm)	6.304	6.304	6.304
7	Luas Sample	(cm ²)	31.20	31.20	31.20
8	Isi Contoh	(cm ³)	61.27	61.27	61.27
9	Berat Isi Basah	(gr/cm ³)	1.96	1.87	1.99
10	Kadar Air. W	(%)	0.40	0.48	0.40
11	Berat Isi Kering	(gr/cm ³)	1.40	1.26	1.42
	Rata-rata Berat Isi Basah Benda Uji	(gr/cm ³)	1.94		
	Rata-rata Kadar Air Benda Uji	(%)	42.71%		

Sumber: *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Tabel 4.7 menyajikan hasil perhitungan sifat fisik tanah pada Sampel Bawah kedalaman 2 meter berdasarkan tiga benda uji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata berat isi basah tanah sebesar 1,94 gr/cm³ dan rata-rata kadar air sebesar 42,71%. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dasar dalam analisis kuat geser dan perencanaan geoteknik.

Tabel 4.8 Hasil perhitungan direct shear sebelum sampel bawah 2 meter

Hasil sebelum pengujian

No	Nomor Cawan	Satuan	D2	4.95	N 19
1	Massa Tanah Basah + Cawan	(gr)	38.70	23.86	51.48
2	Massa Tanah Kering + Cawan	(gr)	27.46	20.46	35.8
3	Massa Air	(gr)	11.24	3.4	15.68
4	Massa Cawan	(gr)	14.8	13.45	24.37
5	Massa Tanah Kering	(gr)	12.66	7.01	11.43
6	Kadar Air	(%)	88.78	48.50	137.18
7	Rata-rata Kadar Air	(%)	91.49		

Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Tabel 4.9 Hasil perhitungan direct shear sesudah sampel bawah 2 meter

Hasil sesudah pengujian

No	Nomor Cawan	Satuan	32	C3	N1 41
1	Massa Tanah Basah + Cawan	(gr)	68.25	70.99	85.79
2	Massa Tanah Kering + Cawan	(gr)	52.18	56.00	67.98
3	Massa Air	(gr)	16.07	14.99	17.81
4	Massa Cawan	(gr)	12.32	24.6	23.53
5	Massa Tanah Kering	(gr)	39.86	31.4	44.45
6	Kadar Air	(%)	40.32	47.74	40.07
7	Rata-rata Kadar Air	(%)	42.71		

Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Tabel tersebut menunjukkan hasil pengujian kadar air tanah sebelum dan sesudah pengujian Direct Shear pada sampel bawah kedalaman 2 meter. Sebelum pengujian diperoleh rata-rata kadar air sebesar 91,49%, sedangkan setelah pengujian rata-rata kadar air menjadi 42,71%. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya penurunan kadar air selama proses pengujian, yang dapat memengaruhi karakteristik dan kuat geser tanah.

Tabel 4.10 Hasil perhitungan direct shear bawah 2 meter

Nilai Kalibrasi : 0.003149341kg Sample 1 Bawah

beban	N1	3	kg	N2	6	kg	N3	12	kg
beban	N1	0.03	KN	N2	0.06	KN	N3	0.12	KN
tegangan normal	σ_1	0.10	kg/cm ²	σ_2	0.19	kg/cm ²	σ_3	0.38	kg/cm ²
tegangan normal	σ_1	9.62	kPa	σ_2	19.23	kPa	σ_3	38.47	kPa

Pergeseran	Bacaan Proving Ring	Gaya Geser	Tegangan Geser	Bacaan Proving Ring	Gaya Geser	Tegangan Geser	Bacaan Proving Ring	Gaya Geser	Tegangan Geser
divisi	divisi	kN	kPa	Divisi i	kN	kPa	divisi i	kN	kPa
0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0,00
50	3,5	0,0 1	3,53	3	0,01	3,2	5	0,02	5,05
100	4	0,0 1	4,04	4,3	0,01	4,3	8	0,03	8,08
150	4,9	0,0 2	4,95	6	0,02	6,1	10	0,03	10,10
200	5	0,0 2	5,05	7	0,02	7,1	12	0,04	12,11
250	6,9	0,0 2	6,97	8	0,03	8,1	12,8	0,04	12,92
300	7	0,0 2	7,07	8,5	0,03	8,6	13,5	0,04	13,63
350	8	0,0 3	8,08	9	0,03	9,1	14,5	0,05	14,64
400	9	0,0 3	9,09	9,4	0,03	9,5	16	0,05	16,15
450				10	0,03	10,1	17	0,05	17,16
500				9,8	0,03	9,9	18	0,06	18,17
550				9,5	0,03	9,6	18	0,06	18,17

Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Tabel tersebut menyajikan hasil pengujian Direct Shear Test pada Sampel 1 bagian bawah dengan tiga variasi beban normal, yaitu 3 kg, 6 kg, dan 12 kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan geser maksimum meningkat seiring bertambahnya beban normal, yaitu masing-masing sebesar 9,09 kPa, 10,10 kPa, dan 18,17 kPa. Data hasil pengujian ini selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter kuat geser tanah.

Tabel 4.11 Hasil perhitungan direct shear bawah 2 meter

Sample 2 Bawah

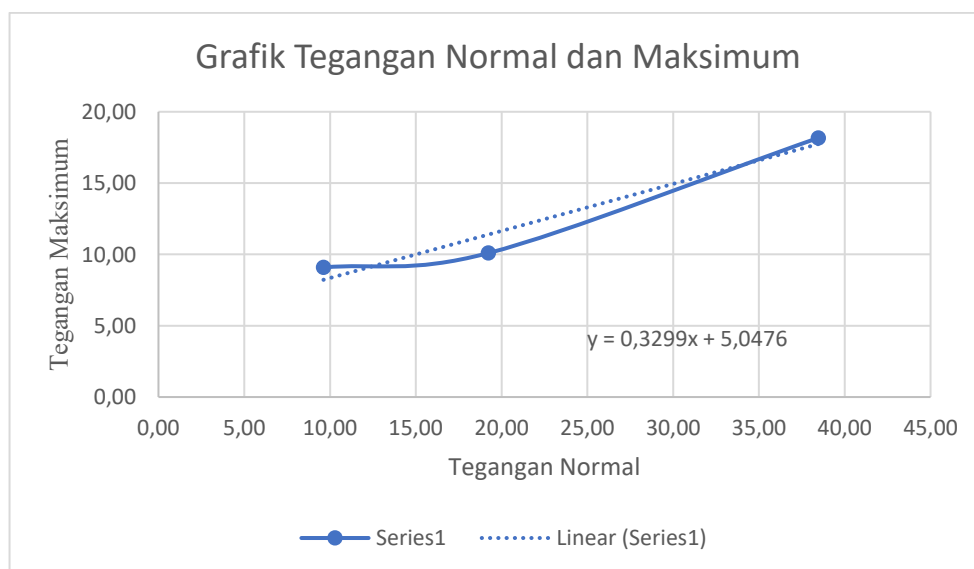
No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Kohesi	5.50	Kpa
2	Sudut Geser Dalam	9.16	
3	Berat Isi Basah	1.94	gr/cm ³
4	Kadar Air	43%	%

Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Tabel 4.12 Hasil perhitungan direct shear bawah 2 meter

Tegangan normal	Tegangan Maksimum
9.62	6.06
19.23	10.1
38.47	11.21

Sumber: *Hasil Analisis Peneliti (2026)*



Gambar 4.4: *Grafik Tegangan Normal dan Maksimum Sampel 2*

Sumber: *Hasil Analisis Peneliti (2026)*

Grafik Tegangan Normal dan Tegangan Maksimum menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum mengalami peningkatan seiring bertambahnya tegangan normal yang diberikan pada sampel tanah. Berdasarkan hasil pengujian, pada tegangan normal sekitar 10, 20, dan 40, diperoleh tegangan maksimum masing-masing sekitar 9, 10, dan 18. Hubungan tersebut ditunjukkan oleh garis tren linier dengan persamaan $y = 0,3299x + 5,0476$, yang mengindikasikan adanya hubungan positif antara tegangan normal dan tegangan maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar tegangan normal yang bekerja pada tanah, maka semakin besar pula tegangan geser maksimum yang mampu ditahan sebelum terjadi keruntuhan, sesuai dengan teori kuat geser tanah (Mohr-Coulomb).

4.2.2 Uji Berat Jenis (hasil uji laboratorium)

Tabel 4.13 Hasil perhitungan berat jenis atas 2 meter

Sample 1 Bagian Atas

Uji Berat Jenis Tanah (Gs) SNI 1964:2008			
Nomor Piknometer		41	147
Berat Piknometer. W1	gram	50.41	50.49
Berat Piknometer + Tanah W2	gram	75.41	75.49
Berat Piknometer + Air + Tanah. W3	gram	165.24	165.28
Berat Piknometer + Air. W4	gram	150.22	150.23
Berat Tanah Kering. Wt = W2 – W1	gram	25	25
W5 = Wt + W4	gram	175.22	175.23
Isi Tanah. W5 – W3	Cm3	9.98	9.95
Temperatur	°C	26.5	26.5
Faktor Koreksi. a = gr/g20		0.9989	
Berat Jenis Spesifik. Gs $\frac{w_t}{w_5 - w_3}$		2.51	2.51
Berat Jenis Rata-rata. Gs		2.51	

Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Berdasarkan hasil uji piknometer sesuai SNI 1964:2008. diperoleh berat jenis spesifik tanah (Gs) rata-rata sebesar 2.51. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tanah yang diuji termasuk tanah mineral normal dan dapat digunakan sebagai salah satu parameter penting dalam analisis geoteknik. seperti perhitungan angka pori. derajat kejenuhan. berat isi tanah. serta analisis stabilitas lereng dan perencanaan pengaman tebing sungai.

Tabel 4.14 Hasil perhitungan berat jenis bawah 2 meter

Sample 2 Bagian Bawah

Uji Berat Jenis Tanah (Gs) SNI 1964:2008			
Nomor Piknometer		41	147
Berat Piknometer. W1	gram	48.79	55.39
Berat Piknometer + Tanah W2	gram	73.79	80.39
Berat Piknometer + Air + Tanah. W3	gram	165.48	169.44
Berat Piknometer + Air. W4	gram	150.52	154.29
Berat Tanah Kering. Wt = W2 – W1	gram	25	25
W5 = Wt + W4	gram	175.32	179.29
Isi Tanah. W5 – W3	Cm3	9.94	9.85
Temperatur	°C	26.6	26.5
Faktor Koreksi. a = gr/g20		0.9984	
Berat Jenis Spesifik. Gs $\frac{w_t}{w_5 - w_3}$		2.54	2.54
Berat Jenis Rata-rata. Gs		2.54	

Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Berdasarkan hasil Uji Berat Jenis Tanah (Gs) metode Piknometer SNI 1964:2008. diperoleh nilai Gs rata-rata sebesar 2.54. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sampel tanah yang diuji termasuk tanah mineral normal dan layak digunakan sebagai parameter dasar dalam analisis geoteknik. seperti perhitungan sifat fisik tanah. stabilitas lereng. serta

perencanaan pengaman tebing sungai dengan bronjong atau analisis menggunakan GeoStudio.

4.2.3 Uji Berat Isi (Hasil Uji Laboratorium)

Tabel 4.15 Hasil perhitungan berat isi

Uji Berat Isi Tanah SNI 03-3637-1994		
Titik 1 Kedalaman -2 Meter		
Contoh Benda Uji	Satuan	
Berat Ring (W1)	gram	32,4
Tinggi Ring	cm	4,9
Diameter Ring	cm	5,5
Berat Cawan	gram	19,5
Berat Ring + Tanah Basah (w2)	gram	286,38
Berat Tanah Basah (W)	gram	245,19
Volume Tanah (V)	cm ³	116,36
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	225,57
Berat tanah kering	gram	206,07
Berat Air	gram	39,12
Berat Jenis (Gs)	gram/cm ³	2,54
Kadar Air (w)	%	19,0%
Void Ratio (e)		0,43
Degree of Saturation (Sr)	%	111,1%
Porositas (n)	%	30,3%
Wet Density	gram/cm ³	2,11
	kN/m ³	20,67
Dry Density	gram/cm ³	1,77
	kN/m ³	17,37
Saturated Density	gram/cm ³	2,074
	kN/m ³	20,34

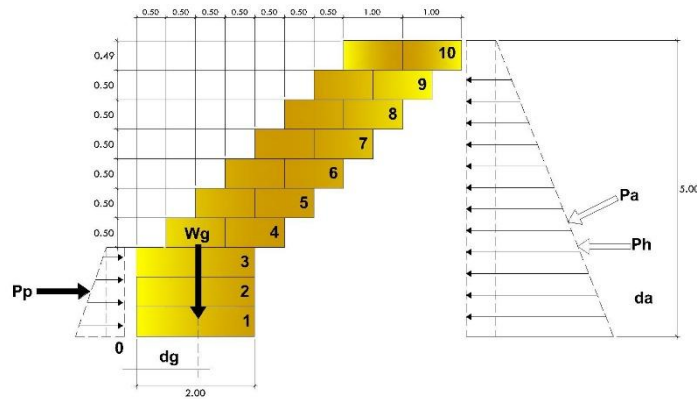
Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2026)

Tabel 4.15 menyajikan hasil uji berat isi tanah berdasarkan SNI 03-3637-1994 pada sampel kedalaman 2 meter. Hasil pengujian menunjukkan kadar air sebesar 19,0%, berat jenis tanah (Gs) sebesar 2,54 gr/cm³, porositas sebesar 30,3%, dan angka pori (e) sebesar 0,43. Selain itu, diperoleh nilai wet density sebesar 2,11 gr/cm³ (20,67 kN/m³), dry density sebesar 1,77 gr/cm³ (17,37 kN/m³), dan saturated density sebesar 2,074 gr/cm³ (20,34 kN/m³). Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai data dasar dalam analisis sifat fisik dan perencanaan geoteknik.

4.3 Dimensi Pengaman Tebing Sungai/Kali

Dimensi penahan tebing sungai jenis bronjong ditentukan sesuai dengan ketinggian tebing, kondisi tanah, dan dampak aliran sungai agar konstruksi dapat menahan beban tanah dan menghindari longsor. Dimensi tersebut ditentukan untuk

memperkuat kestabilan terhadap gaya geser, guling, dan penurunan, serta mengurangi efek gerusan sungai. Hasil analisis stabilitas dengan menggunakan GeoStudio dan beberapa metode seperti Spencer, Morgenstern-Price dan Bishop menunjukkan bahwa dimensi tersebut memenuhi kriteria faktor keamanan (Safety Factor), sehingga dianggap aman dan efisien sebagai pelindung tebing sungai.



Gambar 4.5 Dimensi bronjong pada pengaplikasian AutoCad

Sumber : Hasil analisis peneliti

Berdasarkan gambar yang Anda lampirkan, dapat diidentifikasi bahwa bangunan pengaman tebing menggunakan bronjong bertingkat (stepped gabion wall) dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Tinggi total bronjong = 5,00 m
2. Lebar pondasi = 2,00 m
3. Tinggi setiap trap/lapis = 0,50 m
4. Jumlah trap = 10 lapis ($5,00 \text{ m} \div 0,50 \text{ m}$)

Kemiringan dibuat bertingkat (stepped) sehingga menghasilkan stabilitas yang lebih baik terhadap tekanan tanah dan aliran sungai.

Berikut narasi, analisis, dan alasan yang dapat dimasukkan ke dalam laporan tugas akhir.

1. Dimensi Tembok Penahan Kali

Berdasarkan hasil perencanaan, bangunan pengaman tebing sungai menggunakan konstruksi bronjong bertingkat dengan tinggi total sebesar 5,00 m dan lebar pondasi 2,00 m. Bronjong disusun secara bertahap dengan tinggi masing-masing lapis sebesar 0,50 m, sehingga terbentuk sebanyak 10 lapisan. Susunan bertingkat ini bertujuan untuk meningkatkan stabilitas struktur terhadap tekanan tanah aktif, mengurangi gaya dorong lateral, serta mengikuti bentuk lereng eksisting.

Lebar pondasi sebesar 2,00 m dipilih agar mampu memberikan berat sendiri yang

cukup dalam menahan gaya geser dan gaya guling akibat tekanan tanah maupun beban hidrostatik. Selain itu, konfigurasi bertingkat memungkinkan distribusi beban menjadi lebih merata sehingga risiko penurunan diferensial dan kegagalan lereng dapat diminimalkan.

2. Analisis Dimensi Bronjong

Penentuan dimensi bronjong didasarkan pada kondisi geometri lereng, tinggi tebing yang akan diamankan, karakteristik tanah, serta beban yang bekerja pada struktur.

a. Tinggi Bronjong ($H = 5$ m)

Tinggi bronjong disesuaikan dengan tinggi lereng yang memerlukan perlindungan. Dengan tinggi 5 m, seluruh bidang lereng yang berpotensi longsor dapat tertutup sehingga tekanan tanah dapat ditahan secara optimal. Semakin tinggi struktur maka semakin besar tekanan tanah aktif yang bekerja, sehingga dimensi pondasi harus mampu memberikan faktor keamanan terhadap:

1. Geser (Sliding)
2. Guling (Overturning)
3. Daya dukung tanah (Bearing Capacity)

b. Lebar Pondasi ($B = 2$ m)

1. Lebar pondasi sebesar 2 m dipilih agar:
2. Berat bronjong cukup besar untuk melawan gaya geser.
3. Resultan gaya masih berada di dalam tengah pondasi.
4. Tegangan yang diterima tanah tidak melebihi daya dukung izin.
5. Memenuhi persyaratan faktor keamanan sesuai perencanaan geoteknik.
6. Menentukan Dimensi Pondasi Bronjong

Data Perencanaan

Diketahui:

1. Tinggi tebing yang akan diamankan = 3,5 m
2. Tinggi pondasi bronjong = 1,5 m
3. Tinggi total bronjong = $H = 3,5 + 1,5 = 5,0$ m
4. Lebar pondasi yang akan dicari = B

3. Menentukan Tinggi Pondasi

Menurut praktik perencanaan bronjong, pondasi biasanya ditanam sekitar 20–30% dari tinggi struktur.

Perhitungannya:

$$D=(0,20-0,30)H$$

dengan:

D = kedalaman pondasi

H = tinggi total bronjong

Maka

$$D=0,30 \times 5$$

$$D=1,50\text{m}$$

Sehingga tinggi pondasi dipilih

1,50 meter

Nilai ini termasuk aman karena sekitar 30% dari tinggi struktur.

2. Menentukan Lebar Pondasi

Pedoman umum bronjong:

$$B=(0,40-0,60)H$$

Dengan H = 5 m

Maka

Minimum

$$B=0,40 \times 5$$

$$B=2,0\text{m}$$

Maksimum

$$B=0,60 \times 5$$

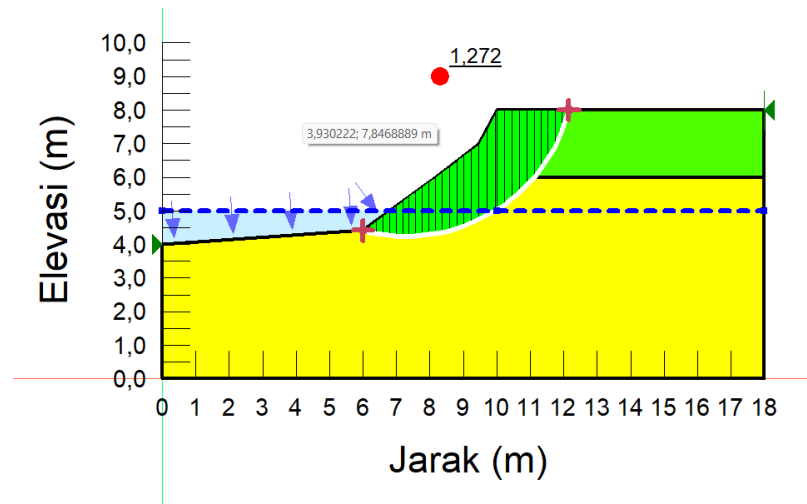
$$B=3,0\text{m}$$

Karena kondisi tanah cukup baik serta untuk efisiensi material, dipilih

Lebar pondasi = 2 meter

4.4 Analisis Lereng Tebing Sungai/Kali Sebelum Perkuatan Menggunakan Aplikasi GeoStudio

Hasil Analisis Lereng Tebing Sungai/Kali Ketika Tinggi Muka Air Normal



Gambar 4.6 Hasil analisis lereng tebing menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

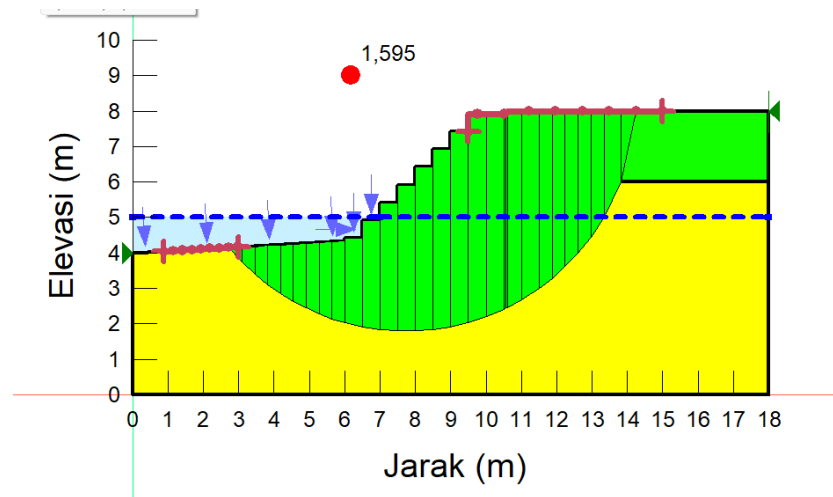
Pada gambar 4.6 Bahwa analisis kestabilan lereng tebing sungai sebelum dilakukan perkuatan dimodelkan menggunakan aplikasi GeoStudio dengan metode Spencer. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai Safety Factor (SF) sebesar 1,272 dengan bidang gelincir kritis yang melewati lereng tebing. Nilai tersebut lebih kecil dari persyaratan faktor keamanan minimum sebesar 1,50 untuk kondisi statis, sehingga lereng dikategorikan tidak aman dan memiliki potensi mengalami longsor. Kondisi ini menunjukkan bahwa gaya penggerak akibat berat tanah, tekanan tanah, dan pengaruh muka air sungai masih lebih dominan dibandingkan gaya penahan lereng. Oleh karena itu, lereng eksisting belum memenuhi kriteria stabilitas dan memerlukan perkuatan, seperti pemasangan bronjong, untuk meningkatkan faktor keamanan sehingga lereng menjadi stabil, mampu menahan tekanan tanah, serta mengurangi risiko longsor dan gerusan akibat aliran sungai.

4.5 Analisis Pengaman Tebing Sungai/Kali Menggunakan Aplikasi GeoStudio

Dalam analisis pengaman tebing sungai/kali peneliti menggunakan 3 jenis metode dalam aplikasi GeoStudio yaitu metode Bishop, Metode Morgenstern-Price, dan Metode Spencer

4.4.1 Analisis Menggunakan Metode Bishop

Analisis pertama dilakukan menggunakan metode Bishop, analisis bertujuan untuk mencari nilai Safety Factor Tebing setelah perkuatan menggunakan bronjong/gabion hasil analisis ditunjukkan pada gambar 4.4

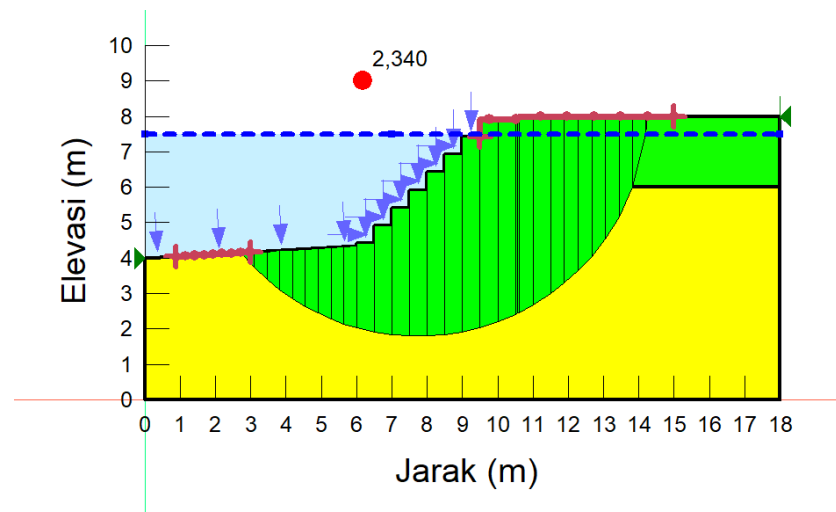


Gambar 4.7 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air normal menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Pada gambar 4.7 Bahwa analisis kestabilan lereng tebing sungai setelah dilakukan perkuatan menggunakan bronjong dilakukan dengan Metode Bishop pada aplikasi GeoStudio. Hasil analisis menunjukkan nilai Safety Factor (SF) sebesar 1,595, yang lebih besar dari nilai minimum 1,50 untuk kondisi statis. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng telah memenuhi kriteria stabilitas dan dikategorikan aman terhadap potensi longsor. Bidang gelincir kritis yang terbentuk berada di bawah struktur bronjong, namun gaya penahan yang dihasilkan oleh berat bronjong dan kuat geser tanah mampu mengimbangi gaya penggerak. Pemasangan bronjong juga berfungsi mengurangi tekanan tanah pada lereng serta meningkatkan kestabilan tebing terhadap pengaruh beban tanah dan muka air sungai. Dengan demikian, perkuatan bronjong terbukti efektif dalam meningkatkan faktor keamanan lereng sehingga risiko longsor dapat diminimalkan dan tebing sungai menjadi lebih stabil.

Narasi ini sesuai dengan hasil pada gambar, yaitu $SF = 1,595 (\geq 1,50)$ sehingga berdasarkan Metode Bishop lereng dinyatakan aman dan stabil setelah dilakukan perkuatan bronjong.

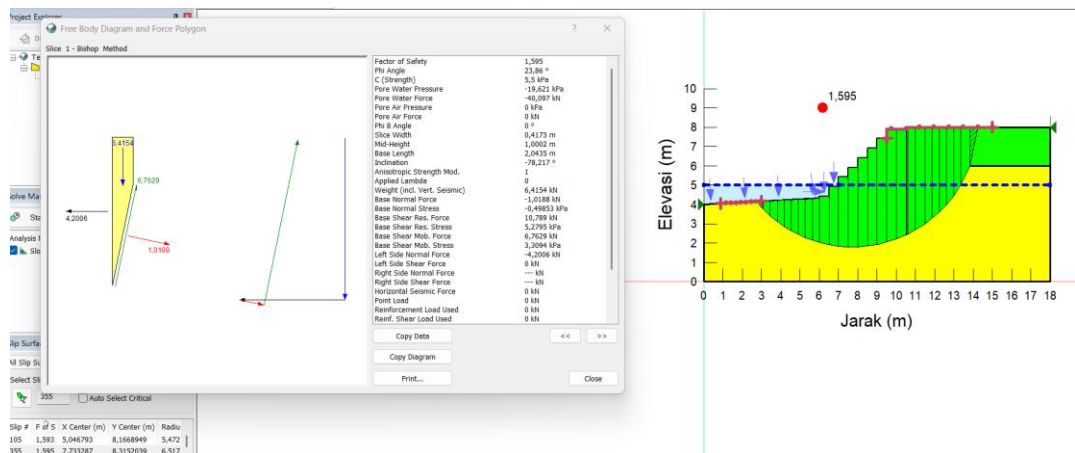


Gambar 4.8 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air tinggi menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Analisis kestabilan lereng tebing sungai yang telah diperkuat dengan bronjong dilakukan melalui Metode Bishop dalam aplikasi GeoStudio dengan mempertimbangkan kondisi permukaan air sungai yang meningkat. Hasil analisis menunjukkan Safety Factor (SF) sebesar 2,340, yang melebihi nilai minimum 1,50 untuk keadaan statis. Angka tersebut mengindikasikan bahwa lereng berada dalam keadaan aman dan stabil terhadap kemungkinan longsor. Area gelincir kritis yang terbentuk masih berada di bawah struktur bronjong, namun tidak mengakibatkan kegagalan lereng karena gaya penahan yang dihasilkan oleh berat bronjong dan gaya geser tanah lebih besar daripada gaya penggerakannya. Selain berfungsi menahan beban tanah, bronjong juga dapat meningkatkan stabilitas lereng terhadap efek tekanan air akibat naiknya level air sungai. Oleh karena itu, penempatan bronjong terbukti efektif dalam meningkatkan faktor keamanan lereng, sehingga risiko terjadinya longsor dapat dikurangi dan tebing sungai tetap kokoh meskipun berada pada keadaan muka air yang lebih tinggi. Narasi ini sejalan dengan hasil yang terlihat pada gambar, yaitu $SF = 2,340$, yang menandakan bahwa stabilitas lereng mengalami peningkatan signifikan setelah perkuatan bronjong dan memenuhi standar keamanan menurut Metode Bishop ($SF \geq 1,50$).

1. Analisis Slice 1 Pada Bagian Atas Menggunakan Metode Bishop



Gambar 4.9 Hasil analisis lereng tebing menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Gambar 4.9 di atas menunjukkan Free Body Diagram dan Force Polygon pada Slice 1 bagian atas dari bidang longsor hasil analisis menggunakan Metode Bishop di aplikasi GeoStudio. Setiap slice merupakan irisan tanah yang dianalisis untuk mengetahui keseimbangan gaya yang bekerja pada lereng. Tujuan analisis ini adalah menghitung perbandingan antara gaya penahan (resisting force) dan gaya penggerak (driving force) sehingga diperoleh nilai Safety Factor (SF) sebagai indikator kestabilan lereng.

Berdasarkan hasil analisis diperoleh Safety Factor (SF) sebesar 1,595, yang berarti nilai tersebut lebih besar dari persyaratan minimum 1,50 untuk kondisi statis. Dengan demikian, lereng yang telah diperkuat menggunakan bronjong dinyatakan stabil dan aman terhadap potensi longsor.

Table 4.16 Analisis tebing Slice 1, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,959	Faktor keamanan lereng. Karena $SF > 1,50$, lereng dinyatakan aman.
Phi Angle (ϕ)	23,86°	Sudut geser dalam tanah yang menunjukkan kemampuan tanah menahan gaya geser akibat gesekan antar butiran tanah.
C (Strength)	5,5 kPa	Nilai kohesi tanah yang memberikan tambahan gaya penahan terhadap longsor.
Pore Water Pressure	-19,621 kPa	Tekanan air pori pada bidang gelincir. Nilai negatif menunjukkan kondisi hisapan (matric suction) yang dapat meningkatkan kuat geser tanah.
Pore Water Force	-40,097 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada bidang gelincir.
Slice Width	0,4173 m	Lebar irisan tanah yang dianalisis.

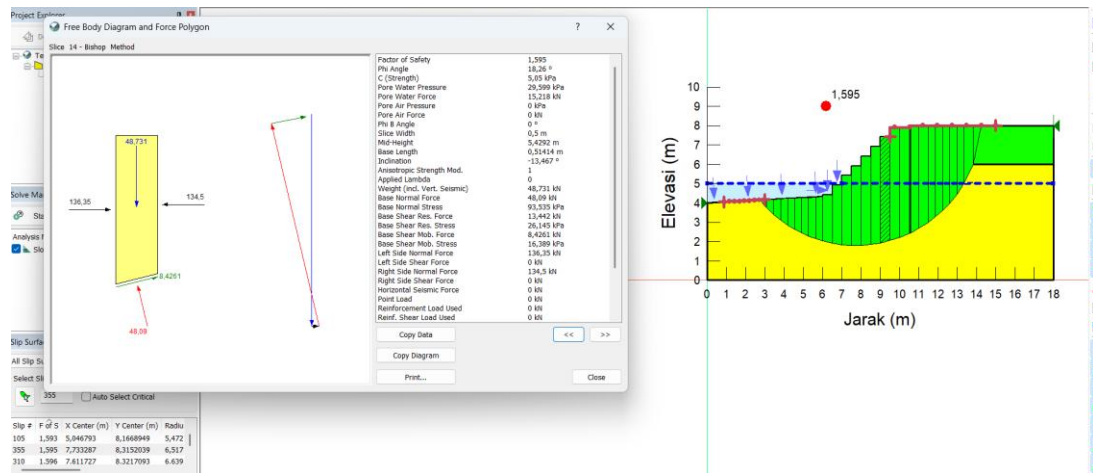
Mid Height	1,0002 m	Tinggi rata-rata irisan tanah.
Base Length	2,0435 m	Panjang dasar bidang gelincir pada irisan tersebut.
Inclination	$-78,217^\circ$	Sudut kemiringan bidang gelincir terhadap bidang horizontal.
Weight	6,4154 kN	Berat sendiri irisan tanah yang menjadi gaya utama penyebab longsor.
Base Normal Force	-1,0188 kN	Gaya normal yang bekerja tegak lurus pada bidang gelincir.
Base Shear Resistance	10,789 kN	Kapasitas maksimum tahanan geser pada bidang gelincir.
Mobilized Shear Force	6,7629 kN	Gaya geser yang termobilisasi untuk menahan longsor. Nilai ini lebih kecil dari kapasitas tahanan geser sehingga lereng masih aman.
Base Shear Mobilized Stress	3,3094 kPa	Tegangan geser yang bekerja pada bidang gelincir.

Sumber : *Hasil analisis peneliti*

Pada Table 4.16 Free Body Diagram di sebelah kiri, panah biru menunjukkan berat irisan tanah (Weight = 6,4154 kN) yang bekerja ke bawah akibat gravitasi. Panah hijau menunjukkan gaya geser yang mampu ditahan tanah (6,7629 kN), sedangkan panah merah menunjukkan gaya normal pada dasar irisan (1,0188 kN). Diagram poligon gaya (Force Polygon) memperlihatkan bahwa seluruh gaya berada dalam kondisi seimbang sehingga menghasilkan $SF = 1,595$.

Secara keseluruhan, hasil analisis pada Slice 1 menunjukkan bahwa gaya penahan yang berasal dari kohesi tanah, sudut geser dalam, dan perkuatan bronjong lebih besar dibandingkan gaya penggerak akibat berat tanah dan tekanan air. Hal ini membuktikan bahwa desain bronjong yang direncanakan mampu meningkatkan kestabilan lereng sehingga memenuhi kriteria keamanan dengan Safety Factor sebesar 1,595 ($> 1,50$).

2. Analisis Slice 14 Pada Bagian Tengah Menggunakan Metode Bishop



Gambar 4.10 Hasil analisis lereng tebing menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Gambar 4.10 di atas menunjukkan Free Body Diagram dan Force Polygon pada Slice 14, yaitu salah satu irisan tanah yang berada pada bagian atas lereng yang telah diperkuat dengan bronjong. Analisis dilakukan menggunakan Metode Bishop untuk mengevaluasi keseimbangan gaya yang bekerja pada setiap irisan tanah, sehingga dapat diketahui kontribusi masing-masing gaya terhadap kestabilan lereng secara keseluruhan. Dari hasil analisis diperoleh Safety Factor (SF) sebesar 1,595, yang lebih besar dari nilai minimum 1,50, sehingga lereng dinyatakan aman dan stabil terhadap potensi longsor.

Table 4.17 Analisis tebing Slice 14, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,595	Faktor keamanan lereng. Karena $SF > 1,50$, lereng dinyatakan aman.
Phi Angle (ϕ)	18,26°	Sudut geser dalam tanah yang menunjukkan kemampuan tanah menahan gaya geser akibat gesekan antar butiran.
C (Strength)	5,05 kPa	Nilai kohesi tanah yang memberikan tambahan gaya penahan terhadap longsor.
Pore Water Pressure	29,599 kPa	Tekanan air pori pada irisan tanah akibat keberadaan muka air. Nilai ini dapat mengurangi kuat geser tanah.
Pore Water Force	15,218 kN	Gaya yang ditimbulkan oleh tekanan air pori pada bidang gelincir.
Slice Width	0,50 m	Lebar irisan tanah yang dianalisis.
Mid Height	5,4292 m	Tinggi rata-rata irisan tanah.
Base Length	0,5141 m	Panjang bidang gelincir pada dasar irisan.
Inclination	-13,467°	Sudut kemiringan bidang gelincir pada irisan.

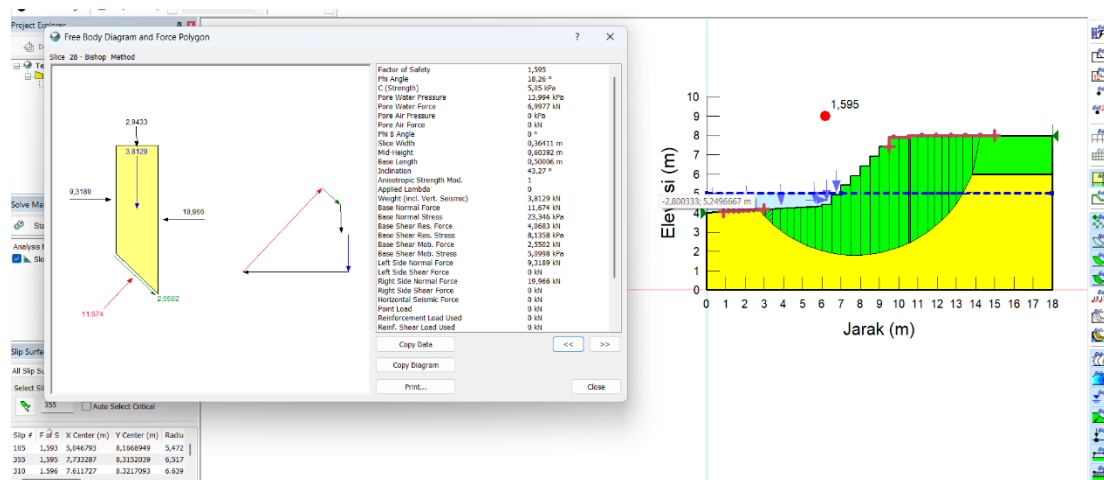
Weight	48,731 kN	Gaya normal yang bekerja tegak lurus pada bidang gelincir.
Base Normal Force	13,442 kN	Kapasitas maksimum tahanan geser pada bidang gelincir.
Base Shear Resistance	10,789 kN	Kapasitas maksimum tahanan geser pada bidang gelincir.
Base Shear Mobilized Force	8,4261 kN	Gaya geser yang termobilisasi untuk menahan longsor. Nilainya masih lebih kecil dari kapasitas tahanan geser sehingga kondisi aman.
Left Side Normal Force	136,35 kN	Gaya normal dari irisan tanah di sebelah kiri yang menunjukkan adanya interaksi antaririsan.
Right Side Normal Force	134,50 kN	Gaya normal dari irisan tanah di sebelah kanan yang membantu menjaga keseimbangan gaya.

Sumber : *Hasil analisis peneliti*

Pada table 4.17 Free Body Diagram, panah biru dengan nilai 48,731 kN menunjukkan berat irisan tanah (Weight) yang bekerja vertikal ke bawah akibat gravitasi. Panah merah sebesar 48,09 kN menunjukkan gaya normal pada bidang gelincir (Base Normal Force), sedangkan panah hijau sebesar 8,4261 kN menunjukkan gaya geser yang termobilisasi (Mobilized Shear Force) untuk menahan pergerakan tanah. Panah horizontal 136,35 kN dan 134,50 kN menunjukkan gaya normal antaririsan (interslice normal forces) yang saling menyeimbangkan antar slice dalam analisis Bishop.

Secara keseluruhan, hasil analisis pada Slice 14 menunjukkan bahwa meskipun berat tanah dan tekanan air pori memberikan gaya penggerak yang cukup besar, tahanan geser tanah yang didukung oleh kekuatan bronjong masih mampu menahan potensi pergerakan lereng. Hal ini dibuktikan dengan Safety Factor sebesar 1,595, yang memenuhi kriteria $SF \geq 1,50$, sehingga desain pengaman tebing sungai menggunakan bronjong dinyatakan am

3. Analisis Slice 28 Pada Bagian Bawah Menggunakan Metode Bishop



Gambar 4.11 Hasil analisis lereng tebing menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Gambar di atas menunjukkan Free Body Diagram dan Force Polygon pada Slice 28 yang merupakan salah satu irisan tanah di bagian kaki lereng pada bidang longsor kritis. Analisis dilakukan menggunakan Metode Bishop untuk mengetahui keseimbangan gaya yang bekerja pada setiap irisan tanah, sehingga dapat dievaluasi apakah gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak. Hasil analisis menunjukkan Safety Factor (SF) sebesar 1,595, sehingga nilai tersebut telah memenuhi persyaratan minimum $SF \geq 1,50$. Dengan demikian, lereng yang telah diperkuat menggunakan bronjong dinyatakan aman dan stabil terhadap potensi longsor.

Table 4.18 Analisis tebing Slice 28, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,959	Faktor keamanan lereng. Nilai ini menunjukkan bahwa gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak sehingga lereng stabil.
Phi Angle (ϕ)	18,26°	Sudut geser dalam tanah yang menggambarkan kemampuan tanah menahan gaya geser akibat gesekan antar butiran.
C (Strength)	5,05 kPa	Kohesi tanah yang memberikan tambahan tahanan terhadap pergerakan tanah.
Pore Water Pressure	13,994 kPa	Tekanan air pori pada irisan tanah yang memengaruhi kuat geser tanah.
Pore Water Force	6,9977 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada bidang gelincir.
Slice Width	0,3641 m	Lebar irisan tanah yang dianalisis.
Mid Height	0,6039 m	Tinggi rata-rata irisan tanah.
Base Length	0,5001 m	Panjang bidang gelincir pada dasar irisan.
Inclination	43,27°	Sudut kemiringan bidang gelincir pada irisan.

Weight	3,8129 kN	Berat sendiri irisan tanah sebagai gaya penggerak akibat gravitasi.
Base Normal Force	11,674 kN	Gaya normal yang bekerja tegak lurus terhadap bidang gelincir.
Base Normal Stress	23,346 kPa	Tegangan normal pada bidang gelincir.
Base Shear Resistance	4,0683 kN	Kapasitas maksimum tahanan geser tanah pada bidang gelincir.
Base Shear Mobilized Force	2,5502 kN	Gaya geser yang termobilisasi untuk menahan pergerakan tanah. Nilainya masih lebih kecil dari kapasitas tahanan geser sehingga kondisi lereng aman.
Left Side Normal Force	9,3189 kN	Gaya normal dari irisan tanah sebelah kiri.
Right Side Normal Force	19,966 kN	Gaya normal dari irisan tanah sebelah kanan.

Sumber : *Hasil analisis peneliti*

Interpretasi Free Body Diagram

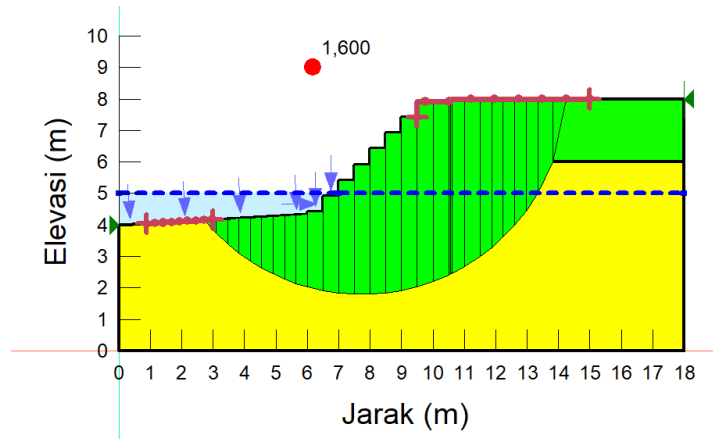
Pada Free Body Diagram terlihat bahwa:

- Panah biru vertikal (3,8129 kN) menunjukkan berat irisan tanah (Weight) yang bekerja ke bawah akibat gravitasi.
- Panah merah miring (11,674 kN) menunjukkan gaya normal pada dasar bidang gelincir (Base Normal Force).
- Panah hijau (2,5502 kN) menunjukkan gaya geser yang termobilisasi (Mobilized Shear Force) untuk menahan kecenderungan longsor.
- Panah horizontal kiri (9,3189 kN) dan kanan (19,966 kN) merupakan gaya normal antaririsan (interslice normal forces) yang menunjukkan interaksi antar slice dalam analisis Bishop.

Hasil analisis pada Slice 28 menunjukkan bahwa meskipun terdapat pengaruh berat tanah dan tekanan air pori yang bekerja sebagai gaya penggerak, tanah masih memiliki kapasitas tahanan geser yang cukup besar. Hal ini diperkuat oleh keberadaan bronjong yang meningkatkan gaya penahan pada lereng. Nilai Safety Factor sebesar 1,595 membuktikan bahwa gaya penahan lebih besar dibandingkan gaya penggerak, sehingga lereng memenuhi kriteria keamanan ($SF \geq 1,50$). Oleh karena itu, desain pengaman tebing sungai menggunakan bronjong dinilai efektif dalam meningkatkan kestabilan lereng dan mengurangi risiko longsor.

4.4.2 Analisis Menggunakan Metode Morgenstern-Price

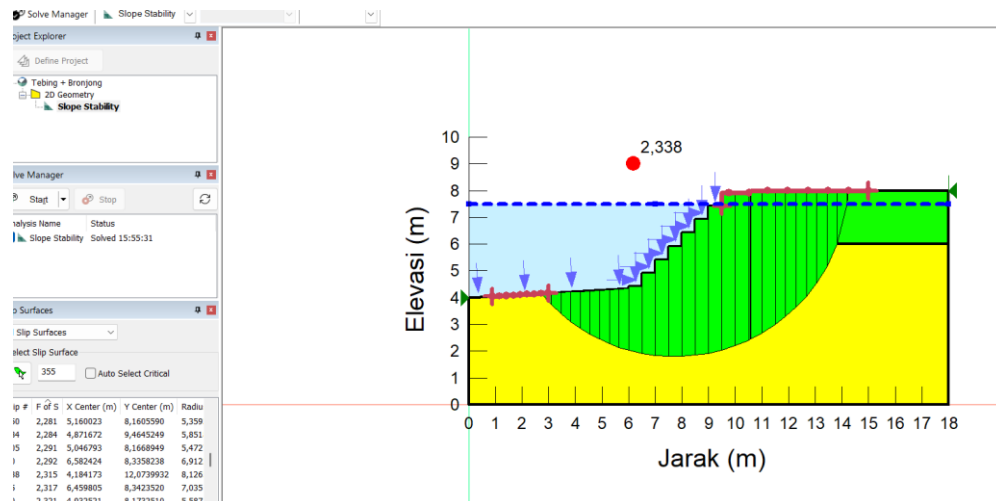
Analisis kedua dilakukan menggunakan metode Morgenstern-Price, analisis bertujuan untuk mencari nilai Safety Factor Tebing setelah perkuatan menggunakan bronjong/gabion hasil analisis ditunjukkan pada gambar 4.9



Gambar 4.12 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air normal menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Pada gambar 4.12 ini menunjukkan hasil analisis kestabilan lereng menggunakan metode Morgenstern-Price pada aplikasi GeoStudio SLOPE/W. Analisis ini menghasilkan nilai Faktor Keamanan (Safety Factor) sebesar 1,600. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng dalam keadaan stabil karena telah memenuhi syarat keamanan ($FS \geq 1,50$). Daerah gelincir kritis berbentuk rotasional dan melintasi dasar lereng, sementara permukaan air tanah dimodelkan pada ketinggian sekitar 5 m untuk mencerminkan keadaan lapangan. Penerapan bronjong bertingkat dapat memperkuat stabilitas lereng dengan menambah gaya penahan terhadap risiko longsor, sehingga desain perlindungan tebing dianggap aman dan cocok untuk diterapkan.

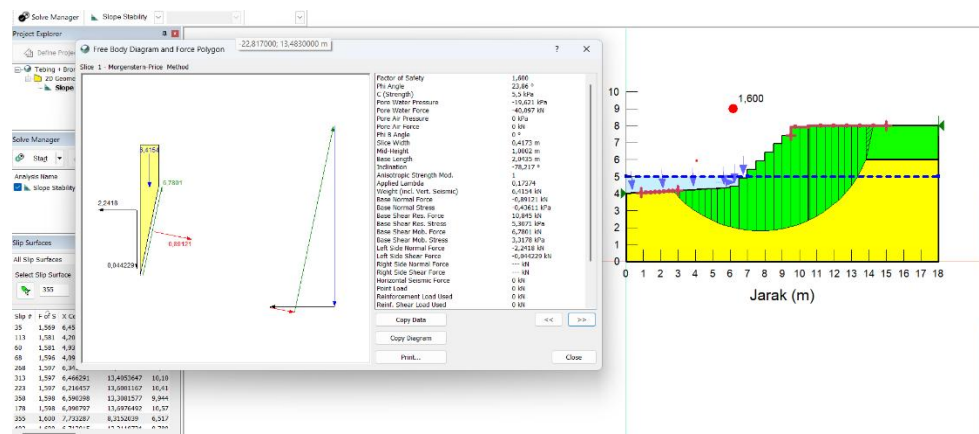


Gambar 4.13 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air tinggi menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Pada Gambar 4.13 ditampilkan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan metode Morgenstern-Price pada GeoStudio SLOPE/W dengan kondisi muka air sungai tinggi. Hasil analisis menunjukkan nilai Faktor Keamanan (Safety Factor) sebesar 2,338, sehingga lereng dinyatakan stabil karena memenuhi kriteria $FS \geq 1,50$. Meskipun muka air sungai meningkat hingga elevasi sekitar 7,5 m, bronjong bertingkat tetap mampu menahan gaya penggerak dan menjaga kestabilan lereng, sehingga dimensi yang direncanakan dinilai aman dan efektif.

1. Analisis Slice 1 Pada Bagian Atas Menggunakan Metode Morgenstern-Price



Gambar 4.14 Hasil analisis lereng tebing menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Pada gambar 4.14 menunjukkan Free Body Diagram (FBD) pada salah satu irisan (slice) hasil analisis stabilitas lereng menggunakan metode Morgenstern-Price di aplikasi GeoStudio SLOPE/W. Diagram ini memperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada irisan

tanah selama proses analisis. Hasil perhitungan menunjukkan nilai Faktor Keamanan (Safety Factor) sebesar 1,600, yang berarti lereng berada dalam kondisi stabil karena memenuhi kriteria keamanan ($FS \geq 1,50$). Parameter tanah yang digunakan meliputi sudut geser dalam (ϕ) sebesar $23,86^\circ$ dan kohesi (c) sebesar 5,5 kPa, sedangkan berat irisan tanah sebesar 6,415 kN merupakan gaya penggerak utama. Gaya normal dan gaya geser pada bidang gelincir dihitung untuk menentukan keseimbangan gaya sehingga diperoleh nilai faktor keamanan yang menunjukkan bahwa lereng aman terhadap potensi kelongsoran.

Table 4.19 Analisis tebing Slice 1, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,600	Nilai keamanan lereng secara keseluruhan. Karena $FS > 1,50$ maka lereng dinyatakan aman.
Phi Angle (ϕ)	$23,86^\circ$	Sudut geser dalam tanah yang menghasilkan tahanan geser akibat gesekan antar butir tanah.
C (Strength)	5,5 kPa	Kohesi tanah, yaitu gaya ikat antar butiran tanah yang menambah kekuatan lereng.
Pore Water Pressure	-19,621 kPa	Tekanan air pori pada dasar irisan. Nilai ini memengaruhi tegangan efektif tanah.
Pore Water Force	-40,097 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada bidang gelincir.
Slice Width	0,4173 m	Lebar irisan (slice) yang digunakan dalam perhitungan.
Base Length	2,0435 m	Panjang dasar bidang gelincir pada Slice 1.
Inclination	$-78,22^\circ$	Sudut kemiringan dasar bidang gelincir terhadap horizontal.
Weight	6,415 kN	Berat irisan tanah yang menjadi gaya penggerak utama.
Base Normal Force	0,891 kN	Gaya yang bekerja tegak lurus bidang gelincir.
Base Shear Resistance	10,845 kN	Gaya geser yang bekerja sepanjang bidang gelincir.
Mobilized Shear Force	6,7629 kN	Gaya geser yang termobilisasi untuk menahan longsor. Nilai ini lebih kecil dari kapasitas tahanan geser sehingga lereng masih aman.
Applied Lambda	0,17374 kPa	Faktor distribusi gaya antar irisan pada metode Morgenstern-Price.

Sumber : Hasil analisis peneliti

Berdasarkan Tabel 4.4, hasil analisis pada Slice 1 menggunakan metode Morgenstern-Price menunjukkan bahwa lereng memiliki nilai Faktor Keamanan (Factor of Safety) sebesar 1,600. Nilai tersebut memenuhi kriteria keamanan ($FS \geq 1,50$),

2. Analisis Slice 1 Pada Bagian Tengah Menggunakan Metode Morgenstern-Price



Table 4.20 Analisis tebing Slice 14, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,600	Faktor keamanan lereng secara keseluruhan. Nilai FS > 1,50 menunjukkan lereng aman terhadap kelongsoran.
Phi Angle (ϕ)	18,26°	Sudut geser dalam tanah yang menghasilkan tahanan geser akibat gesekan antar butiran tanah.
C (Strength)	5,05 kPa	Kohesi tanah yang memberikan tambahan kekuatan pada lereng.
Pore Water Pressure	29,599 kPa	Tekanan air pori pada dasar irisan. Nilai positif menunjukkan irisan berada di bawah muka air tanah sehingga tekanan air pori cukup besar.

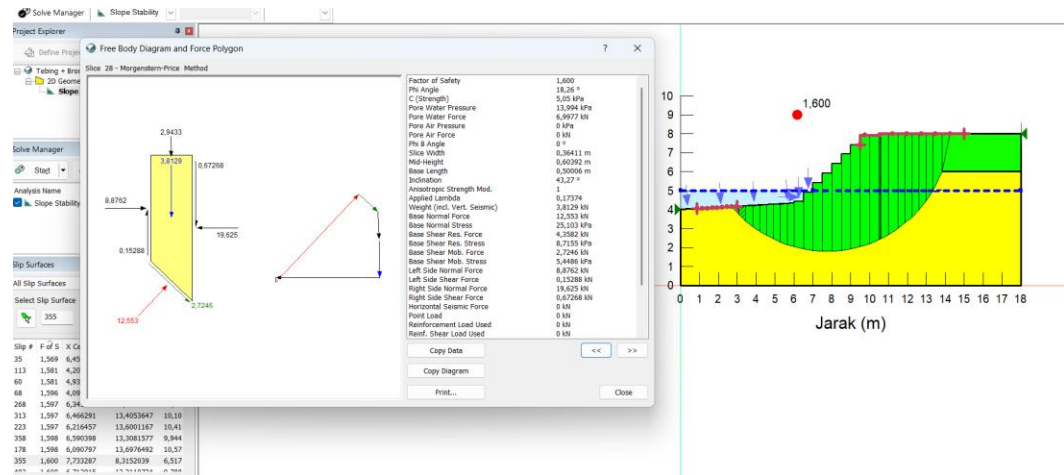
Pore Water Force	15,218 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada bidang gelincir. Semakin besar nilainya, semakin kecil tegangan efektif tanah.
Slice Width	0,50 m	Lebar irisan tanah yang digunakan dalam analisis.
Mid Height	5,4292 m	Tinggi rata-rata irisan tanah.
Base Length	0,51414 m	Panjang bidang gelincir pada Slice 14.
Inclination	-13,467°	Sudut kemiringan bidang gelincir pada irisan.
Weight	48,731 kN	Berat irisan tanah sebagai gaya penggerak utama. Nilainya lebih besar dibanding Slice 1 karena irisan ini lebih tinggi dan volumenya lebih besar.
Base Normal Force	46,926 kN	Gaya geser maksimum yang mampu ditahan tanah berdasarkan parameter kuat geser.
Base Shear Resistance	13,058 kN	Gaya geser yang bekerja sepanjang bidang gelincir.
Mobilized Shear Force	8,1635 kN	Gaya geser yang benar-benar digunakan untuk menahan kelongsoran. Karena nilainya lebih kecil dari kapasitas tahanan geser, lereng masih aman.
Left Side Normal Force	141,18 kN	Gaya normal dari irisan sebelah kiri yang diteruskan ke Slice 14.
Left Side Shear Force	24,286 kN	Gaya geser antar irisan dari sisi kiri.
Right Side Normal Force	138,2 kN	Gaya normal dari Slice 14 menuju irisan sebelah kanan.
Right Side Shear Force	23,093 kN	Gaya geser antar irisan menuju irisan sebelah kanan.
Applied Lambda	0,17374	Faktor distribusi gaya antar irisan pada metode Morgenstern-Price.

Sumber : *Hasil analisis peneliti*

Berdasarkan Tabel 4.20, hasil analisis pada Slice 14 menggunakan metode Morgenstern-Price menunjukkan bahwa lereng memiliki nilai Faktor Keamanan (Factor of Safety) sebesar 1,600, sehingga memenuhi kriteria keamanan ($FS \geq 1,50$) dan dinyatakan stabil terhadap potensi kelongsoran. Parameter kuat geser tanah yang digunakan berupa sudut geser dalam (ϕ) sebesar 18,26° dan kohesi (c) sebesar 5,05 kPa, yang berfungsi memberikan tahanan terhadap gaya penggerak. Berat irisan tanah sebesar 48,731 kN menjadi gaya penggerak utama, sedangkan gaya normal pada bidang gelincir sebesar 46,926 kN menghasilkan tahanan geser yang dipengaruhi oleh tekanan air pori sebesar 29,599 kPa. Selain itu, nilai gaya geser termobilisasi (Mobilized Shear Force) sebesar 8,1635 kN masih lebih kecil dibandingkan gaya geser yang mampu ditahan tanah (Base Shear Resistance) sebesar 13,058 kN. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas

tahanan geser tanah masih mencukupi untuk menahan gaya penggerak, sehingga lereng tetap berada dalam kondisi stabil dan aman sesuai hasil analisis GeoStudio.

3. Analisis Slice 28 Pada Bagian Bawah Menggunakan Metode Morgenstern-Price



Gambar 4.16 Hasil analisis lereng tebing menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Table 4.21 Analisis tebing Slice 28, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,600	Faktor keamanan lereng secara keseluruhan. Nilai FS > 1,50 menunjukkan lereng dalam kondisi stabil.
Phi Angle (ϕ)	18,26°	Sudut geser dalam tanah yang menghasilkan tahanan geser akibat gesekan antar butir tanah.
C (Strength)	5,05 kPa	Kohesi tanah yang memberikan tambahan tahanan terhadap kelongsoran.
Pore Water Pressure	13,994 kPa	Tekanan air pori pada dasar irisan. Nilai ini memengaruhi tegangan efektif tanah.
Pore Water Force	6,9977 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada bidang gelincir.
Slice Width	0,36411 m	Lebar irisan tanah yang digunakan dalam analisis.
Mid Height	0,60392 m	Tinggi rata-rata irisan tanah.
Base Length	0,50006 m	Panjang bidang gelincir pada Slice 28.
Inclination	43,27°	Sudut kemiringan bidang gelincir pada irisan.
Weight	3,8129 kN	Berat irisan tanah sebagai gaya penggerak. Nilainya kecil karena irisan berada di bagian atas lereng dengan volume yang lebih kecil.
Base Normal Force	12,553 kN	Gaya normal yang bekerja tegak lurus bidang gelincir.
Base Shear Resistance	4,3582 kN	Gaya geser maksimum yang mampu ditahan tanah berdasarkan parameter kuat geser.

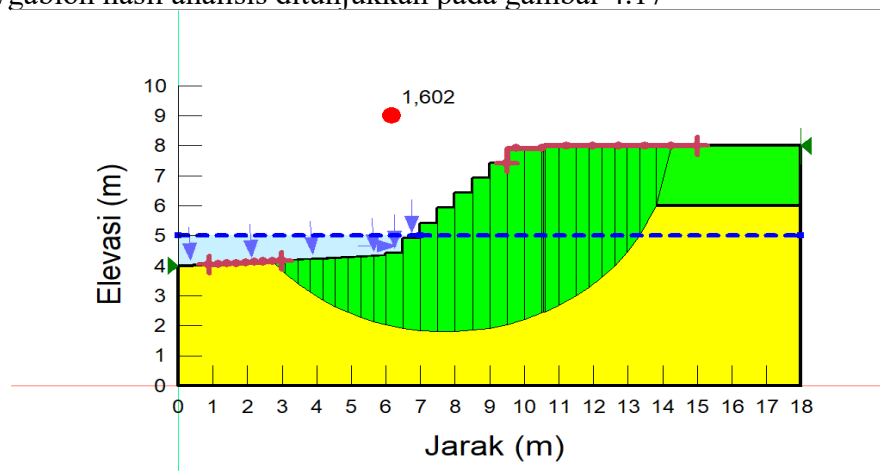
Mobilized Shear Force	2,7246 kN	Gaya geser yang digunakan untuk menahan kelongsoran. Nilainya lebih kecil daripada kapasitas tahanan geser sehingga masih aman.
Left Side Normal Force	8,8762 kN	Gaya normal dari irisan sebelah kiri.
Left Side Shear Force	0,15288 kN	Gaya geser antar irisan dari sisi kiri.
Right Side Normal Force	19,625 kN	Gaya normal dari Slice 14 menuju irisan sebelah kanan.
Right Side Shear Force	0,67268 kN	Gaya geser antar irisan menuju irisan sebelah kanan.
Applied Lambda	0,17374	Faktor distribusi gaya antar irisan pada metode Morgenstern-Price.

Sumber : Hasil analisis peneliti

Berdasarkan Tabel 4.21, hasil analisis Slice 28 dengan metode Morgenstern-Price menunjukkan nilai Faktor Keamanan (FS) sebesar 1,600, sehingga lereng dinyatakan stabil karena memenuhi kriteria $FS \geq 1,50$. Parameter kuat geser tanah yang digunakan yaitu sudut geser dalam (ϕ) $18,26^\circ$ dan kohesi (c) 5,05 kPa, yang memberikan tahanan geser terhadap gaya penggerak. Nilai gaya geser termobilisasi (2,7246 kN) lebih kecil daripada tahanan geser tanah (4,3582 kN), sehingga lereng masih mampu menahan potensi kelongsoran. Distribusi gaya antaririsan juga menunjukkan kondisi yang seimbang, sehingga Slice 28 berada dalam kondisi aman.

4.4.3 Analisis Menggunakan Metode Sprencer

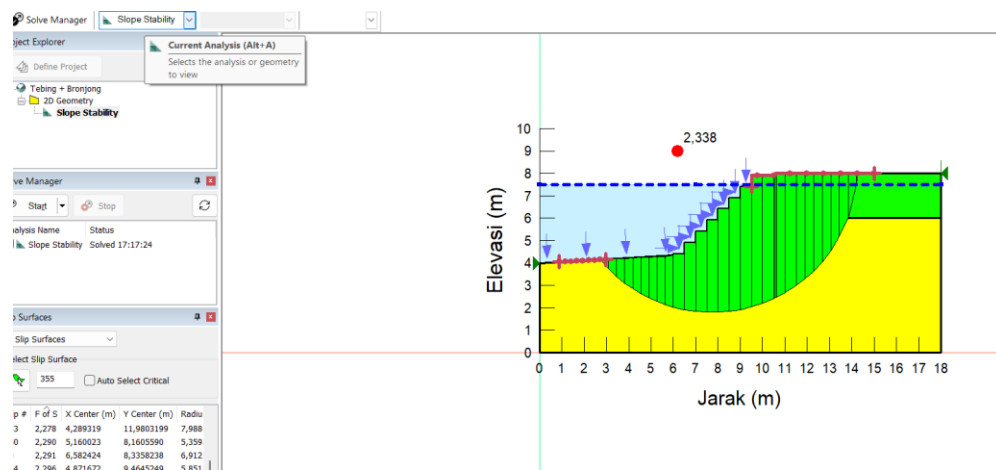
Analisis ketiga dilakukan menggunakan metode Spencer, analisis bertujuan untuk mencari nilai Safety Factor Tebing setelah perkuatan menggunakan bronjong/gabion hasil analisis ditunjukkan pada gambar 4.17



Gambar 4.17 Hasil analisis ltebing pada tinggi muka air normal menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Pada gambar 4.17 menunjukkan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan metode Spencer pada aplikasi GeoStudio SLOPE/W. Hasil analisis memperoleh nilai Faktor Keamanan (Factor of Safety) sebesar 1,602, yang lebih besar dari nilai minimum yang dipersyaratkan ($FS \geq 1,50$). Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng berada dalam kondisi stabil dan aman terhadap potensi kelongsoran. Analisis juga memperhitungkan pengaruh muka air tanah dan bidang gelincir kritis, sehingga hasil yang diperoleh lebih merepresentasikan kondisi lapangan. Struktur bronjong yang direncanakan mampu meningkatkan tahanan geser tanah sehingga gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak. Dengan demikian, dimensi bronjong yang direncanakan dinilai efektif dan layak digunakan sebagai pengaman tebing.

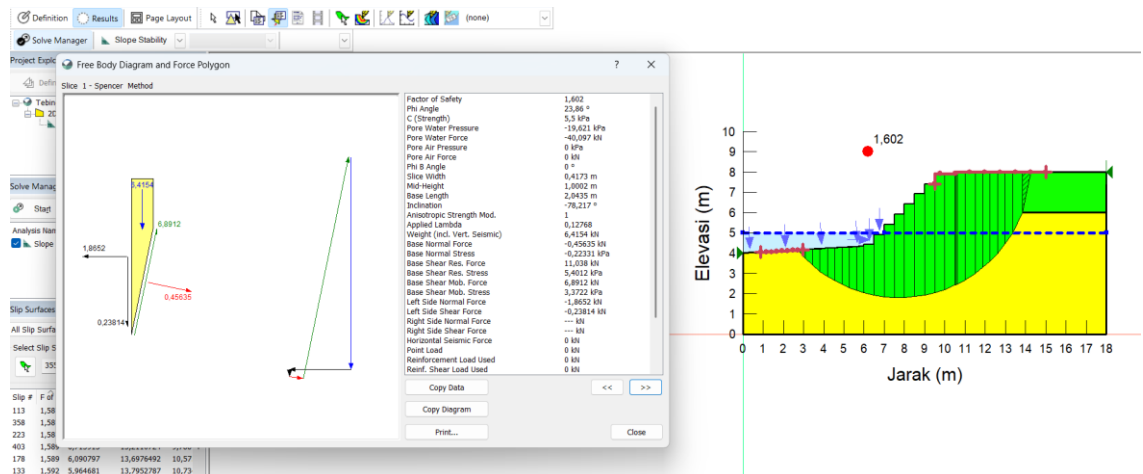


Gambar 4.18 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air tinggi menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Pada gambar 4.18 menunjukkan hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi muka air tinggi menggunakan metode Spencer di aplikasi GeoStudio SLOPE/W. Hasil analisis memperoleh nilai Faktor Keamanan (Factor of Safety) sebesar 2,338, yang lebih besar dari nilai minimum ($FS \geq 1,50$), sehingga lereng dinyatakan stabil dan aman. Meskipun terjadi kenaikan muka air yang meningkatkan tekanan air pori pada lereng, struktur bronjong masih mampu memberikan tahanan yang lebih besar daripada gaya penggerak. Oleh karena itu, dimensi bronjong yang direncanakan dinilai efektif dalam menjaga kestabilan tebing pada kondisi muka air tinggi.

1. Analisis Slice 1 Pada Bagian Atas Menggunakan Metode Spencer



Gambar 4.19 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air tinggi menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Table 4.22 Analisis tebing Slice 01, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

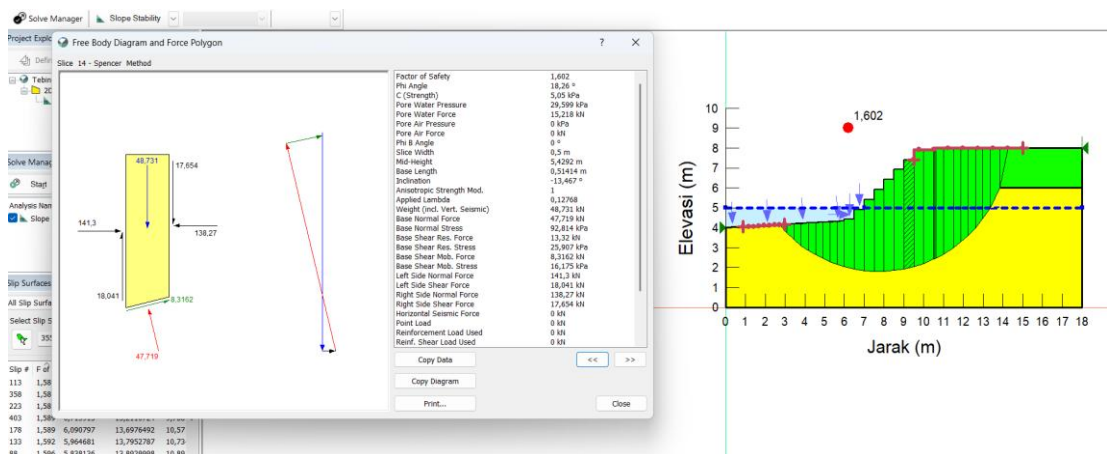
Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,602	Faktor keamanan lereng. Karena $FS > 1,50$, lereng dinyatakan stabil dan aman.
Phi Angle (ϕ)	23,86°	Sudut geser dalam tanah yang menghasilkan tahanan geser akibat gesekan antar butir tanah.
C (Strength)	5,5 kPa	Nilai kohesi tanah yang menambah kekuatan geser tanah.
Pore Water Pressure	-19,621 kPa	Tekanan air pori pada dasar irisan. Nilai negatif menunjukkan tekanan air pori membantu meningkatkan tegangan efektif tanah.
Pore Water Force	-40,097 kN	Gaya akibat tekanan air pori pada bidang gelincir. Nilai negatif menunjukkan arah gaya berlawanan dengan gaya penggerak.
Slice Width	0,4173 m	Lebar irisan tanah yang dianalisis.
Mid Height	1,0002 m	Tinggi rata-rata Slice 01.
Base Length	2,0435 m	Panjang bidang gelincir pada Slice 01.
Inclination	-78,217°	Sudut kemiringan bidang gelincir terhadap horizontal.
Weight	6,4154 kN	Berat irisan tanah yang menjadi gaya penggerak utama.
Base Normal Force	-0,45635 kN	Gaya normal yang bekerja tegak lurus bidang gelincir. Tanda negatif menunjukkan arah gaya sesuai konvensi GeoStudio.
Base Shear Resistance	11,038 kN	Kapasitas maksimum tahanan geser tanah pada bidang gelincir.

Mobilized Shear Force	6,8912 kN	Gaya geser yang benar-benar digunakan untuk menahan kelongsoran. Nilainya masih lebih kecil dari kapasitas tahanan geser.
Base Shear Stress	5,4012 kPa	Tegangan geser yang bekerja pada dasar bidang gelincir.
Base Normal Stress	3,3722 kPa	Tegangan normal pada dasar bidang gelincir.
Left Side Normal Force	-1,8652 kN	Gaya normal dari irisan sebelah kiri.
Left Side Shear Force	-0,23814 kN	Gaya geser antaririsan dari sisi kiri.
Applied Lambda	0,12768	Faktor distribusi gaya antaririsan pada metode Spencer.

Sumber : Hasil analisis peneliti

Berdasarkan Tabel 4.22, hasil analisis Slice 01 menggunakan metode Spencer menunjukkan nilai Factor of Safety (FS) sebesar 1,602, sehingga lereng memenuhi kriteria stabil karena nilai $FS > 1,50$. Parameter kuat geser tanah yang digunakan berupa sudut geser dalam (ϕ) sebesar $23,86^\circ$ dan kohesi (c) sebesar 5,5 kPa, yang memberikan tahanan terhadap potensi kelongsoran. Nilai tekanan air pori (Pore Water Pressure) sebesar -19,621 kPa dan gaya air pori (Pore Water Force) sebesar -40,097 kN menunjukkan pengaruh tekanan air pori pada irisan tanah. Selain itu, nilai Mobilized Shear Force sebesar 6,8912 kN masih lebih kecil dibandingkan Base Shear Resistance sebesar 11,038 kN, sehingga kapasitas tahanan geser tanah masih mampu menahan gaya penggerak. Dengan demikian, Slice 01 berada dalam kondisi stabil dan mendukung hasil analisis keseluruhan bahwa lereng dengan perkuatan bronjong aman terhadap potensi kelongsoran.

2. Analisis Slice 14 Pada Bagian Atas Menggunakan Metode Spencer



Gambar 4.20 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air tinggi menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Table 4.23 Analisis tebing Slice 14, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

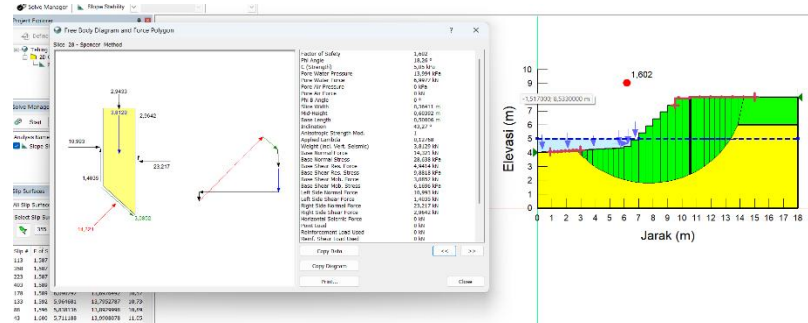
Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,602	Faktor keamanan lereng. Artinya gaya penahan 1,602 kali lebih besar dibanding gaya penggerak.
Phi Angle (ϕ)	18,26°	Sudut geser dalam tanah (ϕ) yang digunakan untuk menghitung kuat geser tanah.
C (Strength)	5,05 kPa	Nilai kohesi tanah sebagai komponen kuat geser.
Pore Water Pressure	29,599 kPa	Tekanan air pori pada dasar slice yang mengurangi tegangan efektif.
Pore Water Force	15,218 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada dasar slice.
Slice Width	0,5 m	Lebar tiap irisan yang digunakan dalam analisis.
Mid Height	5,4292 m	Tinggi rata-rata slice.
Base Length	0,51141 m	Panjang bidang gelincir pada dasar slice..
Inclination	-13,467°	Kemiringan dasar slice terhadap bidang horizontal.
Weight	48,731 kN	Berat tanah pada Slice 14 yang menjadi gaya utama penggerak.
Base Normal Force	47,719 kN	Gaya normal pada bidang gelincir akibat berat tanah.
Base Normal Stress	92,814 kPa	Tegangan normal pada dasar slice.
Base Shear Res. Force	13,32 kN	Gaya geser yang mampu ditahan tanah pada bidang gelincir.
Base Shear Res. Stress	25,907 kPa	Tegangan geser penahan.
Base Normal Stress	3,3722 kPa	Tegangan normal pada dasar bidang gelincir.
Left Side Normal Force	141,3 kN	Gaya normal dari slice sebelah kiri.
Left Side Shear Force	18,041 kN	Gaya geser antar irisan sebelah kiri.
Right Side Normal Force	138,27	Gaya normal dari slice sebelah kanan.
Right Side Shear Force	17,654 kN	Gaya geser antar irisan sebelah kanan.

Sumber : Hasil analisis peneliti

Berdasarkan table 4.23 hasil analisis menggunakan Metode Spencer, Slice 14 memiliki Factor of Safety (FS) sebesar 1,602, sehingga lereng dinyatakan stabil karena nilai FS lebih besar dari 1,50. Parameter tanah yang digunakan meliputi kohesi 5,05 kPa dan sudut geser dalam 18,26°, dengan tekanan air pori 29,599 kPa. Berat irisan sebesar

48,731 kN menghasilkan gaya normal dasar 47,719 kN dan gaya tahan geser 13,32 kN, sehingga mampu menahan gaya penggerak, secara keseluruhan slice 14 memberikan kontribusi positif terhadap kestabilan lereng.

3. Analisis Slice 28 Pada Bagian Atas Menggunakan Metode Spencer



Gambar 4.21 Hasil analisis lereng tebing pada tinggi muka air tinggi menggunakan aplikasi GeoStudio

Sumber : Hasil analisis peneliti

Table 4.24 Analisis tebing Slice 28, nilai-nilai yang tersebut memiliki arti sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Keterangan
Factor of Safety	1,602	Lereng berada dalam kondisi stabil karena gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak.
Phi Angle (ϕ)	18,26°	Sudut geser dalam tanah yang memberikan tahanan terhadap longsor.
C (Strength)	5,05 kPa	Kohesi tanah yang menambah kuat geser tanah.
Pore Water Pressure	13,994 kPa	Tekanan air pori relatif kecil karena slice berada dekat permukaan lereng. Pengaruh air terhadap penurunan kuat geser tidak terlalu besar.
Pore Water Force	6,9977 kN	Gaya akibat tekanan air pori yang bekerja pada dasar slice.
Slice Width	0,36411 m	Lebar irisan lebih kecil dibanding slice lain sehingga volumenya kecil.
Mid Height	0,60392 m	Tinggi irisan rendah karena berada di puncak lereng.
Base Length	0,50006 m	Panjang bidang gelincir pada dasar slice.
Inclination	43,27°	Bidang gelincir cukup curam sehingga sebagian berat tanah berubah menjadi gaya penggerak.
Weight	48,731 kN	Berat tanah pada Slice 14 yang menjadi gaya utama penggerak.
Base Normal Force	14,321 kN	Gaya tekan pada bidang gelincir cukup besar akibat pengaruh gaya dari irisan di sekitarnya.

Base Normal Stress	28,638 kPa	Tegangan normal yang meningkatkan tahanan geser.
Base Shear Res. Force	4,9414 kN	Gaya maksimum yang mampu ditahan tanah.
Base Shear Mobilized Force	3,0852 kN	Gaya geser yang benar-benar bekerja pada bidang longsor. Nilainya lebih kecil dari gaya tahan, sehingga masih aman.
Left Side Normal Force	10,993 kN	Gaya normal dari irisan sebelah kiri.
Left Side Shear Force	1,4035 kN	Gaya geser yang diteruskan dari slice kiri.
Right Side Normal Force	23,217 kN	Gaya normal dari irisan sebelah kanan lebih besar karena menerima pengaruh massa tanah di belakang lereng.
Right Side Shear Force	2,9642 kN	Gaya geser dari slice kanan yang masih berada dalam kondisi seimbang.

Sumber : Hasil analisis peneliti

Berdasarkan table 4.24 hasil analisis menggunakan Metode Spencer, Slice 28 memiliki nilai Factor of Safety (FS) sebesar 1,602 yang menunjukkan kondisi lereng masih stabil karena nilai FS lebih besar dari 1,50. Parameter kuat geser tanah yang digunakan yaitu kohesi sebesar 5,05 kPa dan sudut geser dalam sebesar $18,26^\circ$, dengan tekanan air pori sebesar 13,994 kPa. Berat tanah pada irisan ini relatif kecil, yaitu 3,8129 kN, sehingga gaya penggerak yang terjadi juga kecil. Gaya tahan geser sebesar 4,9414 kN masih lebih besar dibandingkan gaya geser yang termobilisasi sebesar 3,0852 kN, sehingga tidak terjadi kegagalan pada bidang gelincir. Selain itu, gaya normal dan gaya geser antaririsan pada sisi kiri maupun kanan menunjukkan kondisi keseimbangan yang baik, sehingga Slice 28 tetap memberikan kontribusi terhadap kestabilan lereng secara keseluruhan.