

Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode *Finite Element Method* untuk Pembangunan Jembatan Wai Apu

Analysis of Slope Stability Using the Finite Element Method for the Wai Apu Bridge Construction

Arfilian Permana Putra¹, Debby Syafriyandi²

^{1,2}Universitas Esa Unggul, Jakarta Barat, Indonesia

Email: arfilian@esaunggul.ac.id, debby.syafriyandi@esaunggul.ac.id

Article history: Received 20-12-2024, Accepted 27-01-2025, Published 29-01-2025

Abstrak

Pada kondisi dimana pembangunan jembatan yang menghubungkan dua daerah yang terpisah oleh aliran sungai pasti perlu untuk menganalisis dari stabilitas lereng dimana nantinya akan dipergunakan sebagai konstruksi abutment dari konstruksi jembatan. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan meninjau dari stabilitas lereng yang akan digunakan sebagai konstruksi pembangunan jembatan dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan aplikasi *Plaxis 2D* dimana hasil analisisnya berupa bentuk longsor lereng beserta nilai Faktor Keamanan (FK). Peninjauan perhitungan stabilitas lereng akan dimodelkan menjadi dua yaitu ketika lereng kondisi asli dan ketika lereng diberi beban, dengan setiap pemodelan akan ditinjau ketika Muka Air Tanah (MAT) normal dan ketika MAT naik (curah hujan tinggi). Kemudian dengan meninjau permasalahan tersebut didapat nilai analisis dengan FEM pada lereng kiri (arah Mako) ketika lereng tanpa beban dengan MAT normal nilai FK 1,797, dan ketika curah hujan tinggi nilai FK 1,760, pada kondisi lereng dengan beban dengan MAT normal nilai FK 1,714, dan ketika curah hujan tinggi nilai FK 1,680. Kemudian analisis lereng kanan (arah Modanmohe) nilai dari analisis lereng tanpa beban dengan MAT normal nilai FK 1,686, dan ketika curah hujan tinggi nilai FK 1,655, pada kondisi lereng dengan beban dengan MAT normal nilai FK 1,646, dan ketika curah hujan tinggi nilai FK 1,610.

Kata kunci: Faktor Keamanan; Metode Elemen Hingga; MAT; *Plaxis 2D*

Abstract :

In conditions where the construction of a bridge that connects two areas separated by river flows, it is definitely necessary to analyze the stability of the slope which will later be used as an abutment construction for the bridge construction. Therefore, this research will review the stability of the slope that will be used for bridge construction using the Finite Element Method (FEM) with the Plaxis 2D application where the results of the analysis are the shape of the slope failure along with the Safety Factor (FK) value. The review of slope stability calculations will be modeled in two, namely when the slope is in its original condition and when the slope is loaded, with each model being reviewed when the Ground Water Table (GWT) is normal and when the GWT rises (high rainfall). Then, by reviewing these problems, the analysis value obtained using FEM on the left slope (Mako direction) when the slope is unloaded with the GWT normal FK value is 1.797, and when rainfall is high FK value is 1.760, on slope conditions with loads at the GWT normal FK value is 1.714, and when rainfall is high the FK value is 1.680. Then analyze the right slope (Modanmohe direction) the value from the unloaded slope analysis with the GWT normal FK value is 1.689, and when rainfall is high the FK value is 1.655, on slope conditions with loads at the Ground Water Level Normally the FK value is 1.646, and when rainfall is high the FK value is 1.610.

Keywords: Safety Factor; Finite Element Method; GWT; *Plaxis 2D*

1. Pendahuluan

Jembatan merupakan sarana penghubung suatu daerah dengan daerah lainnya dikarenakan akses jalan yang terputus oleh kondisi topografi alam daerah tersebut atau dikarenakan perencanaan rekasa lalu lintas sehingga diperlukannya jalan layang atau *fly over*. Jembatan juga menjadi sarana utama dalam penunjang perekonomian dengan dibangunnya jembatan yang kokoh diharapkan akan memangkas waktu tempuh berkendara untuk mencapai tujuan lainnya, untuk itu perlunya meninjau berbagai aspek sebelum jembatan akan dibangun.

Pekerjaan konstruksi jembatan bentang panjang memerlukan beberapa peninjauan terutama pada konstruksi bawah yang meliputi stabilitas tanah dimana nantinya pilar penyangga konstruksi jembatan berdiri. Perlunya peninjauan stabilitas menjadi langkah awal dalam menentukan fondasi yang akan digunakan untuk pilar jembatan, serta perkuatan tanah jika diperlukan. Ketika suatu abutment jembatan berdiri tepat di atas lereng, maka akan diperlukan juga perhitungan stabilitas lereng tersebut. Peninjauan stabilitas lereng bertujuan untuk melihat nilai dari keamanan lereng itu sendiri berupa bentuk pemodelan keruntuhan lereng dan nilai faktor keamanan [5].

Untuk itu dalam penelitian ini akan menganalisis dari stabilitas tanah sebagai penunjang struktur beban Jembatan Wai Apu. Lokasi pembangunan Jembatan Wai Apu berada di Kabupaten Buru Selatan, Pulau Buru, Provinsi Maluku yang menghubungkan daerah Mako dengan Modanmohe yang terpisah oleh aliran air sungai dengan lebar bentang 132 meter. Topografi dari lokasi pembangunan berada pada dataran tinggi, sehingga perlunya peninjauan stabilitas lereng [1],[2]. Pada perhitungan stabilitas nantinya akan menggunakan *Finite Element Methode* (FEM) dengan *software* Plaxis 2D [6]. Hasil dari analisis nantinya berupa nilai dari faktor keamanan lereng dan bentuk keruntuhan dengan meninjau lereng sebelah kiri yang mengarah ke daerah Mako dan lereng sebelah kanan mengarah ke Modanmohe. Dalam peninjauan stabilitas lereng nantinya akan dimodelkan menjadi dua kondisi, yaitu ketika lereng tanpa ada beban dari jembatan (lereng kondisi asli) dan dengan adanya pembebanan oleh jembatan, lalu masing-masing kondisi akan ditinjau kembali dengan muka air tanah normal dan ketika muka air tanah naik dikarenakan curah hujan yang tinggi [10].

2. Metode Penelitian

a) Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan perhitungan dengan metode elemen hingga atau biasa disebut dengan *Finite Element Method* (FEM) dalam mencari bentuk keruntuhan lereng dan nilai dari Faktor Keamanan lereng. *Finite Element Method* (FEM) sendiri merupakan prosedur perhitungan yang dipakai untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul pada rekayasa teknik dari metode tersebut yang membuat persamaan matematis dengan berbagai pendekatan dan rangkaian persamaan aljabar yang melibatkan nilai-nilai pada titik-titik diskrit pada bagian yang dievaluasi [6],[10].

b) Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus 2023 dalam rangka pembanguna jembatan Wai Apu yang berada di Kabupaten Buru Selatan, Pulau Buru, Provinsi Maluku yang menghubungkan daerah Mako dengan Modanmohe yang terpisah oleh aliran air sungai dengan lebar bentang 132 meter [2].

c) Prosedur Penelitian

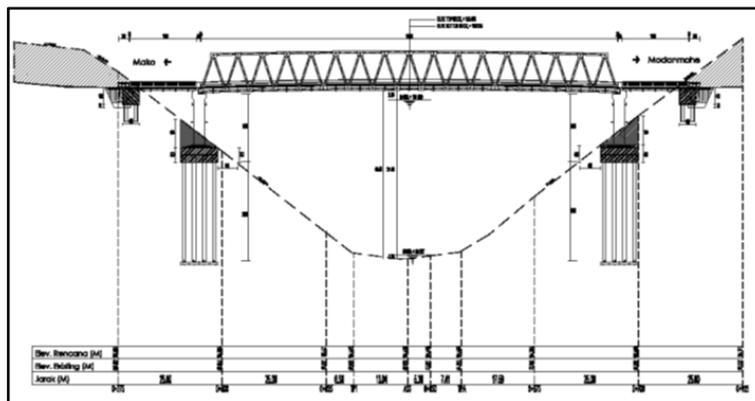
Pada prosesnya penelitian ini menganalisis stabilitas tanah dari data tanah yang telah diuji berupa hasil investigasi tanah yang mana dari investigasi tanah akan menghasilkan nilai parameter tanah, dan jenis tanah yang berada pada lokasi. Hasil dari analisis akan berupa faktor keamanan dari lereng yang mana dengan mengacu pada pedoman SNI 8640:2017(Perencanaan Perancangan Geoteknik), dimana nilai faktor keamanan yang diizinkan sebesar 1,5 [5]. Perhitungan stabilitas akan meninjau stabilitas dari dua lereng, dengan lereng satu mengarah ke daerah Mako, dan satunya lagi mengarah ke Modanmohe.

d) Data dan Teknik Pengumpulan Data

Pada penelitian ini ada beberapa data yang diperlukan yaitu data topografi lokasi pada Gambar 1, data tanah pada Tabel 1, serta gambar rencana jembatan dapat dilihat pada Gambar 2, dan perhitungan beban jembatan. Pengambilan pada data-data tersebut memakai cara observasi atau pengamatan langsung dari lokasi proyek [3]. Berikut merupakan hasil data yang didapat dalam penunjang perhitungan stabilitas tanah.



Gambar 1. Lokasi Pembangunan Jembatan WAI APU



Gambar 2. Desain Jembatan

Dari hasil pemboran dan penyelidikan laboratorium dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Di kaki jembatan sebelah utara atau ke arah Mako tanah keras atau batuan dijumpai pada kedalaman 8 meter, sedangkan di lereng sebelah selatan atau ke arah Modanmohe tanah keras dijumpai pada kedalaman 12 m.
- Tanah atau material di permukaan merupakan hasil lapukan batuan yang didominasi oleh pecahan batuan di bawahnya (sekis – filit), dan tidak bersifat plastis.

Untuk analisis stabilitas lereng dengan metode elemen hingga diperlukan data berat isi, kohesi, dan sudut geser dalam, serta modulus elastisitas. Data lapisan yang dekat permukaan diperoleh dari uji laboratorium. Lapisan tanah di bawahnya menggunakan hasil perhitungan dengan perangkat lunak Roclab, karena pengujian laboratorium hanya menghasilkan kuat tekan uniaxial (*Unconfined Compression Stress*) [4]. Nilai modulus elastisitas diperoleh dari literatur. Data sifat fisik dan mekanik kedua material disajikan pada Tabel 1.

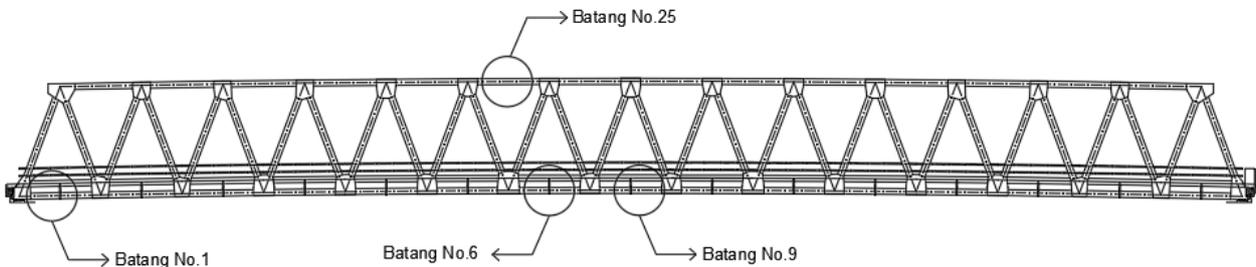
Tabel 1. Parameter Sifat Fisik Tanah

Parameter	Tanda dan Satuan	BH-01 / Modanmohe		BH-02 / Mako	
		Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 1	Lapisan 2
Berat isi	γ (kN/m ³)	24,00	25,00	23,90	25,00
Kadar air	w (%)	16,19	12,30	14,46	12,92
Specific gravity	G _s	2,65	2,61	2,69	2,54
Sudut geser dalam	ϕ (°)	17	28	17	29
Kohesi	c (kN/m ³)	100	163	90	163
Index Plastisitas	%	5,0	5,9	5,1	6,0
Modulus Elastisitas	E (kN/m ³)	15.10 ⁶	84.10 ⁶	15.10 ⁶	84.10 ⁶

Struktur jembatan dapat berfungsi dengan baik untuk suatu lokasi tertentu apabila memenuhi syarat-syarat secara kekuatan dan stabilitas struktural. Untuk mendapatkan jembatan yang memiliki kekuatan serta stabilitas struktur tentunya perencanaan suatu konstruksi jembatan harus melalui beberapa tahap melalui survey secara langsung di lapangan, tentunya juga mengacu kepada standar yang berlaku seperti perencanaan struktur baja untuk jembatan (RSNI T-03-2005) dan pembebanan untuk jembatan (SNI 1725 : 2016) [7], [8]. Pada Tabel 2 diperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada jembatan dengan memasukan perhitungan pembebanan pada aplikasi SAP2000 dan nomer batang yang tedampak dengan gaya paling besar diperlihatkan pada Gambar 3.

Tabel 2. Gaya-Gaya Dalam Struktur Jembatan

Jenis Gaya	No. Batang	Nilai Gaya	Keterangan
Gaya Tarik	No.25	8000,211 kN	Maksimum
Gaya Tekan	No.6	-23194,676 kN	Maksimum
Gaya Geser	No. 1	116,908 kN	Maksimum
Momen	No.9	15089,6167 kN	Maksimum



Gambar 3. Letak Gaya Dalam Jembatan

e) Teknik Analisis Data

Dalam menganalisis dari data yang telah didapat sebelumnya dalam penelitian ini menggunakan perhitungan dengan metode elemen hingga dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D. Persamaan metode elemen hingga dibuat dan dicari solusinya dengan sebaik mungkin untuk menghindari kesalahan pada hasil akhirnya. Jaringan (*mesh*) terdiri dari elemen - elemen yang dihubungkan oleh *node*. *Node* merupakan titik - titik pada jaringan di mana nilai dari variabel primernya dihitung. Misal untuk analisa *displacement*, nilai variabel primernya adalah nilai dari *displacement*. Nilai-nilai nodal *displacement* diinterpolasikan pada elemen agar didapatkan persamaan aljabar untuk *displacement*, dan regangan, melalui jaringan - jaringan yang terbentuk [6]. Untuk ketetapan dari nilai faktor keamanan menggunakan J.E. Bowles (1999) dimana untuk ketetapan faktor keamanan pada lereng sebagai berikut [9]:

- SF < 1,07 : Keruntuhan biasa terjadi (labil)
- 1,07 < SF < 1,25 : Keruntuhan pernah terjadi (kritis)
- SF ≥ 1,25 : Keruntuhan jarang terjadi (stabil)

Kemudian untuk kriteria stabilitas lereng berdasarkan SNI 8640:2017 tentang persyaratan perancangan geoteknik dapat dilihat pada Tabel 3 [5].

Tabel 3. Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng

Biaya dan Konsekuensi dari Kegagalan Lereng	Tingkat Ketidakpastian Kondisi Analisis	
	Rendah ^a	Tinggi ^b
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih

^a Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi lapangan.
^b Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan.

(Sumber: Perencanaan Perancangan Geoteknik SNI 8640:2017)

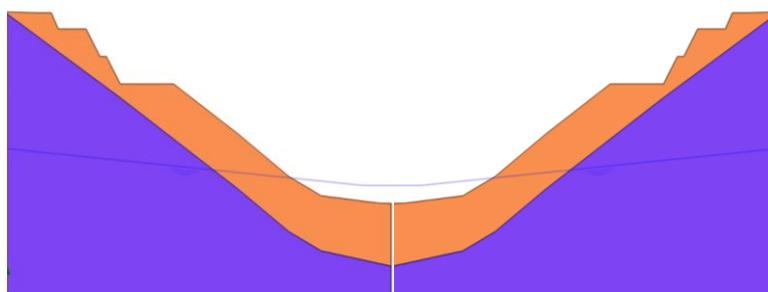
3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Analisis ini dilakukan dengan bukti, bahwa:

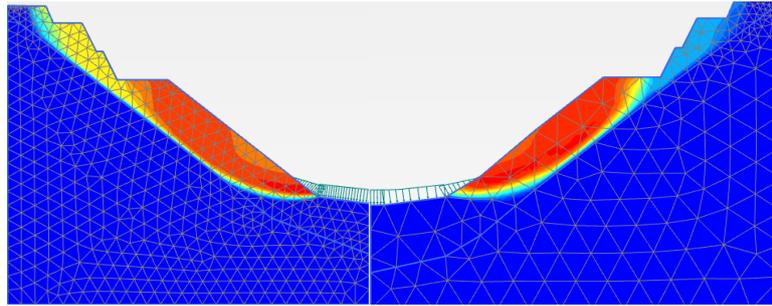
1. Hasil pemboran SPT menghasilkan 2 lapisan material dengan sifat fisik dan mekanik yang berbeda, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai parameter sifat fisik tanah (Tabel 1).
2. Material di permukaan merupakan batuan metamorf yang telah lapuk sedang sampai tinggi, sehingga nampak sebagai tanah berbutir lepas dengan fraksi utama pasir dan kerikil. Hasil uji laboratorium menunjukkan harga sudut geser dalam antara 17° sampai 29° , kohesi 100 kN/m^2 , yang mana nilainya kurang lebih sama dengan pasir dan index plastisitas kecil (<10) atau non plastis. Bagian ini ditunjukkan oleh nilai SPT rerata sama dengan 25. Lapisan ini dijumpai sampai kedalaman 10 meter di lereng arah Mako.
3. Material yang terletak di bawah 10 meter tersusun oleh batuan metamorf, berstruktur foliasi, jenis Filit dan Sekis dengan nilai SPT = 60.

a) Pemodelan Lereng Asli Tanpa Beban Ketika MAT Normal

Pada pemodelan lereng jika tanpa beban dan dengan kondisi muka air tanah normal, dapat dilihat pada Gambar 4, kemudian dari pemodelan hasil dari kalkulasi perhitungan faktor keamanan dapat dilihat pada Gambar 6 dan bentuk dari keruntuhan lereng bisa dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Pemodelan Lereng Asli Tanpa Beban MAT Normal



Gambar 5. Bentuk Keruntuhan Lereng Asli Tanpa Beban MAT Normal

Jika melihat hasil dari bentuk keruntuhan lereng pada Gambar 6 terlihat bentuk keruntuhan lereng bertipikal *circular* yang ditandai warna merah yang berarti bahwa keruntuhan ekstrim akan terjadi pada area tersebut, namun jika melihat hasil dari nilai faktor keamanan pada Gambar 7 lereng pada kedua sisi masih masuk dalam kategori aman. Pada posisi lapisan tanah kedua berwarna biru yang mengindikasikan bahwa lapisan tanah kedua tergolong stabil.

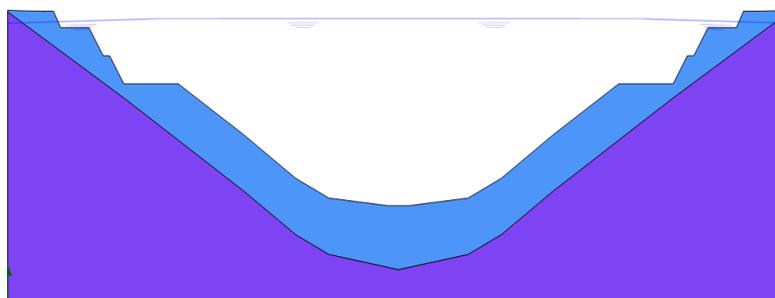
Reached values		Reached values	
Reached total time	0,000 day	Reached total time	0,000 day
CSP - Relative stiffness	-0,1145E-9	CSP - Relative stiffness	0,2883E-9
ForceX - Reached total forc	0,000 kN	ForceX - Reached total forc	0,000 kN
ForceY - Reached total forc	0,000 kN	ForceY - Reached total forc	0,000 kN
Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²	Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²
ΣM _{stage} - Reached phase p	0,000	ΣM _{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM _{weight} - Reached weight	1,000	ΣM _{weight} - Reached weight	1,000
ΣM _{sf} - Reached safety fact	1,797	ΣM _{sf} - Reached safety fact	1,686

Gambar 6. Hasil Faktor Keamanan Lereng Asli Tanpa Beban MAT Normal

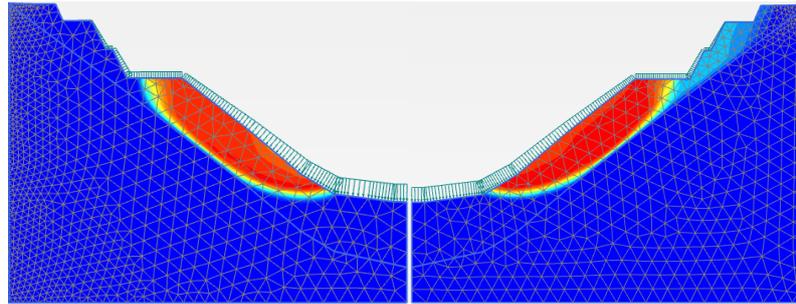
Dari hasil pemodelan dan perhitungan ini longsor hanya terjadi pada zona pelapukan atau tanah hasil pelapukan sekis dan filit di lereng yang menuju Modanmohe. Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga menghasilkan angka keamanan sebesar 1,797 untuk lereng ke arah Mako dan 1,686 untuk lereng ke arah Modanmohe. Dengan memperhatikan ketetapan nilai dari faktor keamanan SNI 8640:2017 maka nilai FK lereng di kedua sisi jembatan tergolong stabil. Lereng dengan kondisi asli tanpa ada perkuatan sudah cukup stabil, ini dikarenakan hasil dari investigasi tanah mengindikasikan bahwa tanah di lokasi cenderung bertipikal tanah berbatu [4].

b) Pemodelan Lereng Asli Tanpa Beban Ketika MAT Naik

Pemodelan dilakukan dengan kondisi muka air tanah yang naik, karena disebabkan oleh tingginya curah hujan sehingga akan dimodelkan dalam kondisi yang ekstrem (Gambar 7). Tujuan dari pemodelan ini untuk meningkatkan masa layan dari struktur jembatan nantinya, karena dengan kondisi yang ekstrem akan berpengaruh terhadap perencanaan struktur jembatan [8].



Gambar 7. Pemodelan Lereng Asli Tanpa Beban MAT Naik



Gambar 8. Bentuk Keruntuhan Lereng Asli Tanpa Beban MAT Naik

Hasil dari bentuk keruntuhan lereng pada Gambar 8 terlihat bentuk keruntuhan lereng bertipikal *circular* yang ditandai warna merah yang berarti bahwa keruntuhan ekstrim akan terjadi pada area tersebut, namun jika melihat hasil dari nilai faktor keamanan pada Gambar 9 lereng pada kedua sisi masih masuk dalam kategori aman. Pada posisi lapisan tanah kedua berwarna biru yang mengindikasikan bahwa lapisan tanah kedua tergolong stabil.

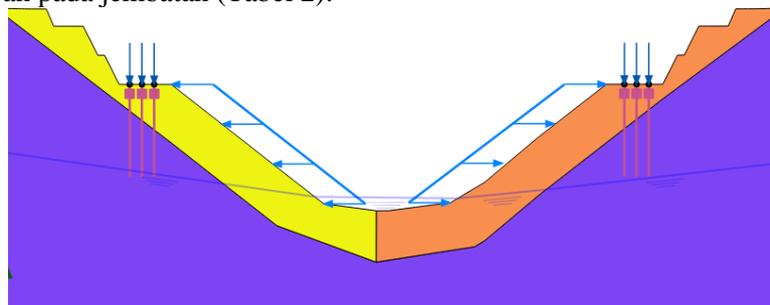
Reached values		Reached values	
Reached total time	0,000 day	Reached total time	0,000 day
CSP - Relative stiffness	-0,07449E-9	CSP - Relative stiffness	-0,4362E-9
ForceX - Reached total forc	0,000 kN	ForceX - Reached total forc	0,000 kN
ForceY - Reached total forc	0,000 kN	ForceY - Reached total forc	0,000 kN
Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²	Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²
ZM _{stage} - Reached phase p	0,000	ZM _{stage} - Reached phase p	0,000
ZM _{weight} - Reached weight	1,000	ZM _{weight} - Reached weight	1,000
ZM _{sf} - Reached safety fact	1,760	ZM _{sf} - Reached safety fact	1,655

Gambar 9. Hasil Faktor Keamanan Lereng Asli Tanpa Beban MAT Naik

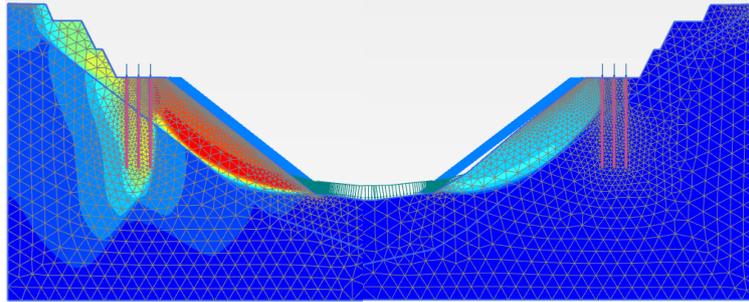
Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga menunjukkan bahwa potensi longsoran hanya terjadi pada lereng ke arah Modanmohe, sama dengan ketika sebelum penggenangan. Angka faktor keamanan setelah penggenangan cenderung turun menjadi 1,760 untuk lereng ke arah Mako dan 1,655 untuk lereng ke arah Modanmohe. Hal ini dapat terjadi akibat gaya horizontal yang disebabkan oleh air, namun lereng masih cukup stabil, dan tidak perlu adanya perkuatan [10].

c) Pemodelan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Normal

Pemodelan dilakukan sebagai akibat pembebanan pada lereng (Gambar 10). Penempatan pondasi jembatan dilakukan dengan memakai pondasi dangkal atau pondasi *strauss* sedalam 10 meter di atas masa batuan yang belum mengalami pelapukan [4], [8]. Beban yang dimasukkan sebesar 23194,676 kN mengacu pada hasil rekapan hitungan beban pada jembatan (Tabel 2).



Gambar 10. Pemodelan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Normal



Gambar 21. Bentuk Keruntuhan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Normal

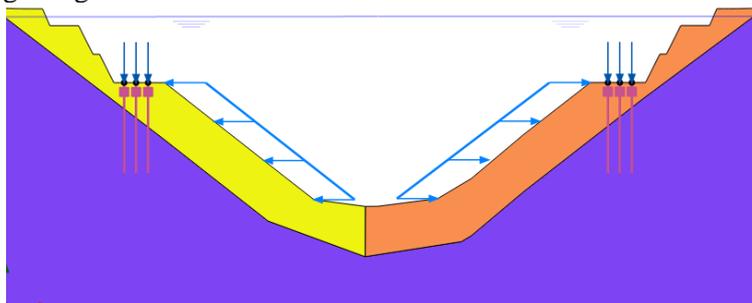
Untuk lereng pada pemodelan jika diberi beban ketika muka air tanah normal (Gambar 11). Hasil pemodelan memperlihatkan bentuk longsoran yang ekstrim pada lereng sebelah kiri menuju Mako yang ditandai warna merah, sedangkan bentuk lereng menuju Modanmohe berwarna biru muda sehingga longsoran lebih stabil dibandingkan menuju arah Mako, namun perlu ditinjau kembali bahwa faktor keamanan lereng menuju Mako juga tergolong masih aman walaupun berwarna merah untuk hasil keruntuhannya.

Reached values		Reached values	
Reached total time	0,000 day	Reached total time	0,000 day
CSP - Relative stiffness	0,2054E-3	CSP - Relative stiffness	-0,1003E-9
ForceX - Reached total force	0,000 kN	ForceX - Reached total force	0,000 kN
ForceY - Reached total force	0,000 kN	ForceY - Reached total force	0,000 kN
Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²	Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²
ZM _{stage} - Reached phase p	0,000	ZM _{stage} - Reached phase p	0,000
ZM _{weight} - Reached weight	1,000	ZM _{weight} - Reached weight	1,000
ZM _{sf} - Reached safety fact	1,714	ZM _{sf} - Reached safety fact	1,646

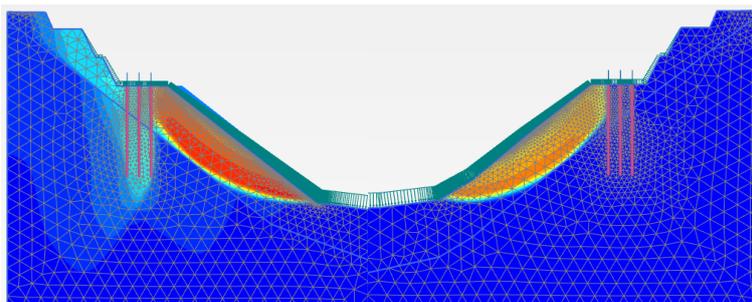
Gambar 12. Hasil Faktor Keamanan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Normal

Akibat pembebanan ini terjadi penurunan kestabilan, khususnya pada bagian zona pelapukan baik lereng ke arah Mako, maupun ke arah Modanmohe. Hasil perhitungan menunjukkan angka faktor keamanan lereng ke arah Mako menjadi 1,714 (Gambar 12), sedangkan ke arah Medanmohe menjadi 1,646. Walaupun terjadi penurunan nilai faktor keamanan, namun lereng masih terhitung stabil. Perhitungan ini dilakukan pada kondisi sebelum muka air tanah naik [10].

d) Pemodelan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Naik



Gambar 33. Pemodelan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Naik



Gambar 44. Bentuk Keruntuhan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Naik

Pemodelan lereng jika diberi beban dan terjadi kenaikan muka air tanah masih memperlihatkan bentuk longsoran yang ekstrim pada lereng sebelah kiri menuju Mako yang ditandai warna merah (Gambar 13 dan 14). sedangkan bentuk lereng menuju Modanmohe berwarna merah kekuning-kuningan sehingga longsoran tanah tergolong stabil dibandingkan menuju arah Mako, namun perlu ditinjau kembali bahwa faktor keamanan lereng menuju Mako juga tergolong masih aman walaupun berwarna merah untuk hasil keruntuhannya.

Reached values		Reached values	
Reached total time	0,000 day	Reached total time	0,000 day
CSP - Relative stiffness	1,427E-3	CSP - Relative stiffness	-0,2069E-9
ForceX - Reached total forc	0,000 kN	ForceX - Reached total forc	0,000 kN
ForceY - Reached total forc	0,000 kN	ForceY - Reached total forc	0,000 kN
Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²	Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²
ZM _{stage} - Reached phase p	0,000	ZM _{stage} - Reached phase p	0,000
ZM _{weight} - Reached weight	1,000	ZM _{weight} - Reached weight	1,000
ZM _{sf} - Reached safety fact	1,680	ZM _{sf} - Reached safety fact	1,610

Gambar 55. Hasil Faktor Keamanan Lereng Dengan Beban Ketika MAT Naik

Pada hasil kalkulasi perhitungan stabilitas lereng dengan adanya pembebanan dan dalam kondisi muka air tanah naik terjadi penurunan nilai faktor keamanan khususnya pada bagian zona pelapukan baik lereng ke arah Mako, maupun ke arah Modanmohe. Angka Faktor Keamanan ke arah Mako menjadi 1,680 (Gambar 15), sedangkan ke arah Modanmohe menjadi 1,610. Penurunan nilai faktor keamanan yang kecil ini kemungkinan disebabkan oleh gaya gesek air sepanjang lereng [10]. Untuk rekapitulasi hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Nilai Faktor Kemanan Lereng

Kondisi	Nilai Faktor Keamanan Lereng Kiri (Arah Mako)		Nilai Faktor Keamanan Lereng Kanan (Arah Modanmohe)	
	MAT Normal	MAT Naik	MAT Normal	MAT Naik
	Lereng Asli	1,797	1,760	1,686
Lereng Dengan Pembebanan	1,714	1,680	1,646	1,610

Kesimpulan

1. Ketika kondisi lereng asli dengan Muka Air Tanah (MAT) normal faktor keamanan lereng kiri (menuju Mako) sebesar 1,797 dan lereng sebelah kanan (menuju Modanmohe) sebesar 1,686. Dilihat dari ketetapan nilai faktor keamanan pada stabilitas lereng kiri dan kanan masih termasuk dalam kategori stabil, dengan hasil faktor keamanan lebih besar dari 1,5.
2. Ketika lereng asli dengan kondisi MAT naik faktor keamanannya jadi menurun, untuk faktor keamanan lereng sisi kiri yang menuju ke Mako sebesar 1,760 dan untuk faktor keamanan lereng sisi kanan menuju Modanmohe sebesar 1,655. Walaupun faktor keamanan menurun untuk lereng kiri dan kanan, tetapi masih masuk dalam kategori lereng yang stabil dengan nilai FK lebih besar dari 1,5.
3. Untuk lereng ketika ada beban pada kondisi MAT normal lereng menuju Mako memiliki FK sebesar 1,714 dan untuk lereng menuju Modanmohe memiliki FK sebesar 1,646. Pada kondisi MAT naik nilai FK untuk lereng menuju Mako sebesar 1,680 kemudian lereng menuju Modanmohe didapat nilai FK sebesar 1,610. Dari hasil tersebut walaupun faktor keamanan menurun untuk lereng kiri dan kanan juga masih masuk dalam kategori lereng yang stabil dengan nilai FK lebih besar dari 1,5 ketika kondisi lereng galian.
4. Hasil analisis kalkulasi dengan metode elemen hingga menggunakan Plaxis 2D lereng menuju Mako dan Modanmohe masih tergolong lereng yang stabil sehingga tidak perlu perhitungan lebih lanjut untuk kekuatan lereng.

Saran

Material penyusun lereng tidak terpengaruh oleh masuknya air dalam rekahan masa batuan, karena masa batuan tidak mengandung mineral lempung yang bersifat mengembang (*expansive soil*). Hasil uji lab menunjukkan butiran halus pada material permukaan memiliki pastisitas rendah. Namun demikian dalam jangka panjang masuknya air dalam masa batuan dapat menyebabkan proses pelapukan berjalan lebih cepat.

Untuk itu rekahan di sekitar lokasi jembatan perlu ditutup dengan semen dengan cara digrouting. Kecepatan aliran air sungai perlu ditinjau kembali untuk melihat besarnya air dalam mempengaruhi faktor pelapukan lereng batuan.

Daftar Pustaka

- [1] Putri, D. R., Hutabarat, J., & Haryanto, A. D. (2021). *Zonasi Permeabilitas Pada Area Manifestasi Panas Bumi Di Daerah Kabupaten Buru Provinsi Maluku*. *Geoscience Journal*, 5(5), 453-466.
- [2] Zarkasyi, A., Hermawan D., Kasbani. 2007. *Penyelidikan Terpadu Daerah Panas Bumi Wapsalit Kabupaten Buru Provinsi Maluku*. *Proceeding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Dan Non Lapangan Tahun 2007 Pusat Sumber Daya Geologi*.
- [3] Widodo, S., Kasbani, K., Sulaeman, B., Sumardi, E., & Iim, D. (2007). *Potensi Panas Bumi Wilayah Kabupaten Buru–Maluku*. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 2(1), 94-101.
- [4] Gschwind, S., Loew, S., & Wolter, A. 2019. *Multi Stage Structural and Kinematic Analysis of A Retrogressive Rock Slope Instability Complex (Preonzo, Switzerland)*, *Engineering Geology* Vol. 252, 2019 : 27-42.
- [5] Badan Standarisasi Nasional. SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [6] Manual *PLAXIS 2D* Version CE V20.
- [7] Badan Standarisasi Nasional. 2005. *Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. K SNI T-03-2005. Jakarta. Badan Standarisasi Nasional. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. SNI 1725:2016. Jakarta.
- [8] Badan Standarisasi Nasional. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. SNI 1725:2016. Jakarta.
- [9] Bowles, Joseph E. (1997). *Foundation Analysis And Design (Fifth Edition)*. New York: The McGraw-Hill Companies.
- [10] Taylor, D.W (1937), *Stability of earth Slopes*, *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 24, 197-246 13.