



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



KAJIAN PASCA LONGSOR TEBING JALAN DAN METODE PENANGANANNYA

O.T Purwadi ^a, Iswan ^{*a}, K. Usman ^a, Aurelius S.K ^a

^ajurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Bandar Lampung

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima 10/11/2025
Direvisi 11/12/2025

Kata kunci:
Dinding penahan tanah
Finite Element Method
Limit Equilibrium Method
Mini pile
Sheet pile
Stabilitas lereng

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi penyebab kelongsoran serta merancang metode penanganan yang efektif pada ruas Jalan Lahat-Simpang Mio. Berdasarkan investigasi geoteknik, area tersebut didominasi oleh lima lapisan tanah lempung dengan karakteristik dari lunak hingga keras, dimana pemicu utama instabilitas adalah geometri lereng yang curam, kondisi tanah dasar yang buruk, dan kenaikan muka air tanah akibat curah hujan tinggi. Analisis awal pada kondisi eksisting menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan *Finite Element Method* (FEM) mengindikasikan kondisi lereng tidak aman dengan nilai *Safety Factor* (SF) statis berkisar 1,2 dan dinamis mendekati 1,0, disertai penurunan jalan mencapai 13,037 cm. Untuk menanggulangi permasalahan tersebut, dua alternatif perkuatan dievaluasi, yaitu Dinding Penahan Tanah (DPT) kombinasi *Mini pile* dan penggunaan *sheet pile*. Simulasi permodelan dilakukan melalui tahapan konstruksi (*staged construction*) untuk memastikan keamanan di setiap fase pengerjaan. Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua metode perkuatan mampu memenuhi kriteria keamanan SNI 8460:2017. Perkuatan DPT + *Mini pile* menghasilkan SF statis maksimum 1,571 dan dinamis 1,162, sedangkan *sheet pile* mencapai SF statis 1,572 dan dinamis 1,188. Selain peningkatan stabilitas yang signifikan, kedua metode berhasil meminimalkan deformasi jalan menjadi 7,827 cm. Oleh karena itu, kedua desain perkuatan dinilai layak dan direkomendasikan sebagai solusi teknis rehabilitasi lereng pasca longsor di wilayah tersebut.

^{*a} Korespondensi
E-mail: iswan.1972@eng.unila.ac.id

1. Pendahuluan

Longsor merupakan peristiwa pergerakan lapisan tanah, runtuh batu, atau tanah yang bergerak miring ke bawah dalam jumlah banyak atau sebagai sebuah massa, karena adanya tarikan gravitasi (Plummer, 2007). Mayoritas kejadian tanah longsor dipicu oleh infiltrasi air, gempa dan pencairan gletser. Analisis mengenai jenis longsor diperlukan pada proses mitigasi. Dengan diketahui tipe longsor maka akan membantu dalam penentuan tindakan mitigasi yang diperlukan. Menurut Cruden & Varnes (dalam Hardiyatmo 2012) jenis longsor dapat dibagi menjadi longsor rotasi, translasi, pergerakan blok, runtuh batu, tipe rayapan tanah, dan aliran debris (bahan rombakan). Infiltrasi air hujan menjadi penyebab terganggunya stabilitas lereng serta gempa bumi. Perubahan iklim serta kejadian hujan ekstrim, telah menyebabkan meningkatnya frekuensi kejadian bencana hidrometeorologi. Infiltrasi air dalam lereng menyebabkan berkurangnya kekuatan geser tanah karena gaya apung yang diberikan oleh air pada tanah jenuh dan pengisapan tanah pada tanah tak jenuh (Chen et al., 2015). Menurut UU Nomor 24 tahun 2007 mengenai Penanggulangan Bencana, bencana yaitu peristiwa ataupun rangkaian peristiwa yang bisa mengancam dan mengganggu kehidupan maupun penghidupan masyarakat, yang disebabkan oleh faktor alam dan atau nonalam maupun manusia sehingga menimbulkan korban jiwa manusia (Republik Indonesia, 2007). Longsor yang disebabkan oleh infiltrasi curah hujan dan mekanisme pemicu yang relevan telah dipelajari secara luas. Infiltrasi air menyebabkan meningkatnya berat tanah, gaya rembesan dan tekanan air pori. sementara kekuatan mekanik tanah menjadi turun. Peningkatan tekanan air pori di lereng mengurangi tekanan efektif tanah dan dapat memicu kegagalan lereng. Tekanan gas pori di lereng juga mengurangi tegangan efektif tanah (Liu et al., 2018). Terjadinya genangan mendorong proses keruntuhan tebing akibat tekanan hidrostatis serta tekanan pori. Untuk mencegah runtuhnya tebing maka keberadaan genangan harus dantisipasi (Nanda & Hamdan, 2016) Oleh sebab itu diperlukan penelitian terhadap tingkat keamanan lereng. Tingkat keamanan suatu lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah faktor kemiringan dan beban yang bekerja di atasnya. Kondisi lereng dengan beban yang besar dan kemiringan yang curam dapat menyebabkan terjadinya kelongsoran. Pengaruh perubahan fungsi lereng sebagai wilayah yang seharusnya steril terhadap pemanfaatan lereng sebagai wilayah hunian, sehingga merubah karakteristik sifat lereng yang alamiah. Hal ini tentunya sangat membahayakan keselamatan masyarakat yang menghuni disekitar lereng-lereng perbukitan, dan diperlukan solusi dan evaluasi menjadikan lereng

tersebut aman dari bahaya longsor. Ada beberapa metode dalam melakukan analisis stabilitas lereng, salah satunya yaitu metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*). Analisis stabilitas lereng dengan metode ini sangat membutuhkan ketelitian dan ketekunan untuk mendapatkan hasil yang akurat, sehingga analisis dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer. Kelebihan dari analisis komputasi ini yaitu dapat menghitung angka aman secara akurat dalam waktu yang singkat. Karena menggunakan prinsip metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*). Kebaharuan dan kontribusi untuk ilmu pengetahuan pada Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian penelitian sebelumnya tentang ketidakstabilan lereng akibat perubahan fungsi lereng, di lokasi yang diteliti terjadi perubahan sangat ekstrim yaitu banyaknya kupasan tanah pada lereng yang menjadikan lereng buatan yang dirubah dengan kemiringan yang dibentuk oleh manusia untuk perumahan.

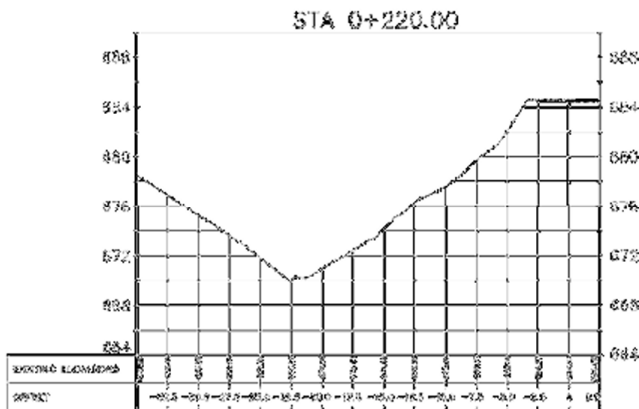
Daerah Kabupaten Lahat memiliki kondisi geografis yang bervariasi, kondisi geografisnya, meliputi daerah berbukit-bukit, dataran tinggi dan pegunungan Bukit Barisan dengan Gunung Dempo sebagai puncak tertinggi. Kabupaten Lahat merupakan salah satu daerah di Indonesia yang rawan terjadi bencana tanah longsor. Faktor yang paling banyak menyebabkan kegagalan lereng adalah karena dipengaruhi oleh air hujan. Curah hujan daerah Lahat pada periode April 2022 - Maret 2023 mencapai angka lebih dari 3.000 mm pertahunnya. Selain itu, wilayah ini didominasi oleh jenis tanah lempung dengan tingkat kerentanan yang cukup tinggi, Selain itu, Kabupaten Lahat merupakan area dataran tinggi dengan kemiringan lereng di atas 15%, sehingga bencana longsor rawan terjadi (Rijalullah et al., 2023) Oleh karena itu diperlukan kajian potensi longsor akibat kerusakan lingkungan pada daerah di Kabupaten Lahat.

2. Metodologi

2.1. Lokasi penelitian

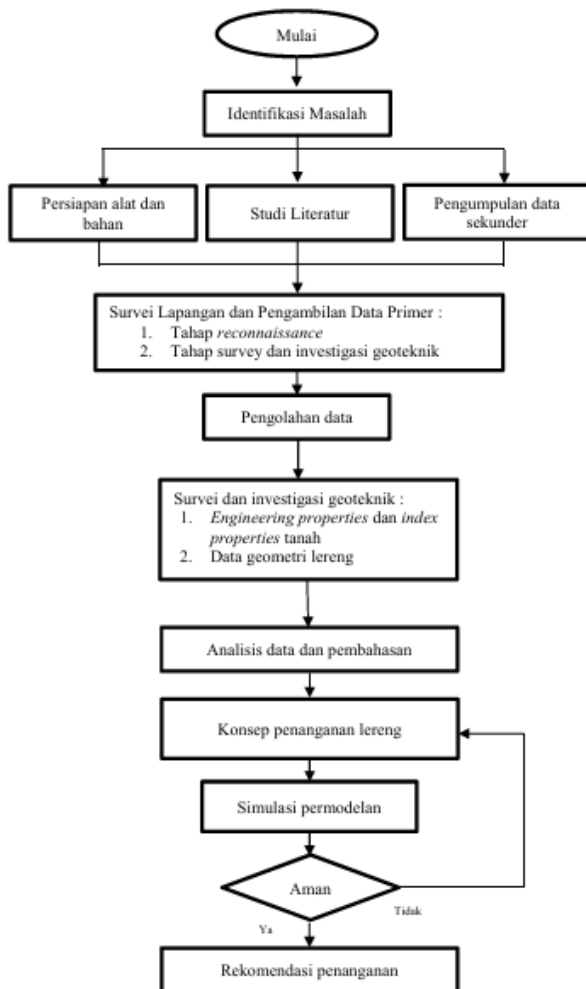
Lokasi penelitian berada di Desa Sukarami, Kecamatan Kota Agung, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatra Selatan. Lokasi penelitian berada di koordinat 4°03'06.53" lintang selatan dan 103°25'44.21" bujur timur.

Untuk potongan lereng yang akan digunakan sebagai model analisa stabilitas lereng adalah potongan pada STA 0+220.00 yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Potongan lereng.

Adapun tahapan pada penelitian ini digambarkan pada diagram alir penelitian seperti berikut.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

2.2. Tahapan pengumpulan data

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini yaitu menggunakan data primer.

A. Data Primer

Data yang digunakan berupa data hasil uji tanah pada lokasi penelitian di laboratorium mekanika tanah.

1. Indeks properti tanah yang didapatkan dari hasil laboratorium.
2. Mensimulasikan perbaikan pasca longsor dengan melakukan proses penimbunan dan penggunaan perkuatan lereng, dengan perkuatan *sheet pile* dibandingkan dengan dinding penahan tanah kombinasi *mini pile*.

2.3. Tahapan analisis stabilitas lereng

1. Potongan melintang lereng
Langkah awal pada penelitian ini adalah menentukan bentuk dari potongan melintang lereng yang akan dilakukan perbaikan lereng pasca longsor dengan melakukan penambahan timbunan dan perkuatan *sheet pile* sebagai simulasi 1 serta melakukan timbunan dengan perkuatan dinding penahan tanah dan *mini pile* sebagai simulasi ke 2.
2. Penentuan kondisi analisis
Langkah selanjutnya adalah menentukan kondisi yang akan dianalisis, analisis yang dilakukan menggunakan menggunakan dua simulasi yaitu :
 1. Dengan melakukan penimbunan dan diperkuat dengan konstruksi *sheet pile*
 2. Dengan melakukan penimbunan dan diperkuat dengan konstruksi dinding penahan tanah dan *mini pile*
3. Menganalisis stabilitas lereng pasca longsor menggunakan analisis komputasi.
Setelah menganalisis data properti tanah dan membuat simulasi perbaikan lereng pasca longsor selanjutnya dilakukan simulasi.
 1. Kondisi existing
 2. Kondisi existing + gempa
 3. Galian lapisan 1
 4. Galian lapisan 2
 5. Galian lapisan 3
 6. Konstruksi (DPT + *mini pile*)/(Sheet Pile)
 7. Timbunan 1
 8. Timbunan 2
 9. Desain perkuatan
 10. Desain perkuatan + beban kendaraan
 11. Desain perkuatan + beban kendaraan + Beban gempa
4. Menganalisis stabilitas lereng menggunakan analisis komputasi
Setelah mengumpulkan data properti tanah dan membuat simulasi bentuk potongan melintang lereng, selanjutnya ialah menginput data-data tersebut pada analisis komputasi untuk dianalisis lebih lanjut.

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Hasil investigasi geoteknik

3.1.1 Kondisi daerah longsor

Ruas Jalan Lahat-Simpang Mio mengalami longsor di badan jalannya. Longsor pada area ini terjadi setelah hujan deras yang mengguyur pada malam sebelumnya. Longsor ini menyebabkan hilangnya bahu jalan pada area lereng. Selain itu, kondisi lereng menjadi sangat curam setelah longsor terjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Dokumentasi longsor.

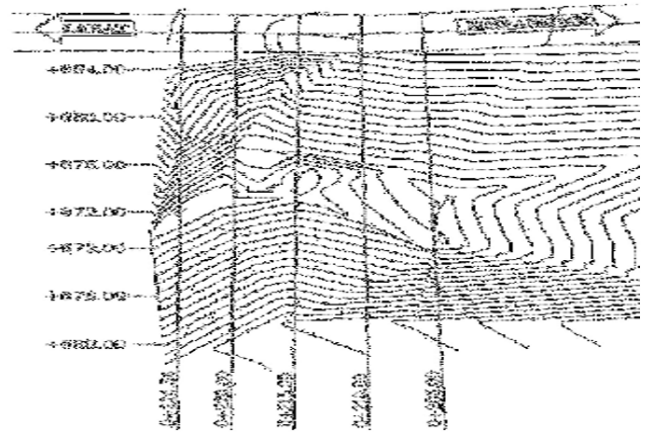
Hasil survei lapangan dan dokumentasi yang diambil menunjukkan tidak ditemukannya saluran drainase di sepanjang jalan. Hanya terdapat satu drainase kecil yang melintang di area dekat rumah warga. Hal ini menyebabkan hujan langsung melimpas ke jalan dan badan lereng, sehingga aliran permukaan tidak dapat terkontrol terutama saat musim hujan. Tata guna lahan pada lereng bagian atas adalah jalan dan perkebunan, dan pada bagian bawah lereng adalah semak belukar dan pepohonan. Pada bagian kaki lereng, ditemukan adanya aliran sungai yang mengalir.

Longsor yang terjadi pada bahu jalan bergerak mengarah ke pusat bumi dan terdapat lengkungan di bagian sumbu pusat. Selain itu, terlihat jenis tanah pada area ini didominasi oleh lempung dan tidak terdapat perbedaan jenis material tanah di badan lerengnya. Oleh karena itu, longsor pada area ini termasuk kedalam klasifikasi longsor rotasional

3.1.2 Kondisi geomorfologi

Kondisi geomorfologi didapat dari hasil survei topografi untuk menentukan sudut lereng dan perbedaan elevasi. Berdasarkan hasil survei topografi, daerah longsor yang ditinjau dibagi menjadi 5 potongan lereng dengan jarak per 5 meter seperti yang ditampilkan pada Gambar 4. Rata-rata kemiringan pada potongan tersebut berkisar di angka 30 - 45°, sehingga lereng tersebut masuk dalam kategori curam.

Untuk potongan lereng yang akan digunakan sebagai model analisa stabilitas lereng adalah potongan pada STA 0+220.00 yang terlihat pada Gambar 1. Potongan ini dipilih karena potongan tersebut memiliki kemiringan curam dan kondisi yang juga ekstrim, sehingga perkuatan yang direncanakan akan dibuat berdasarkan model yang ditinjau. Hal ini bertujuan agar desain perkuatan mampu menahan kondisi dan situasi terburuk yang akan dialami oleh lereng tersebut.



Gambar 4. topografi daerah longsor.

3.1.3 Kondisi geologi

Berdasarkan peta geologi pada area Lahat, lokasi penelitian berada area formasi geologi dengan kode QHvd yang merupakan bagian dari hasil aktivitas vulkanik Gunung Dempo. Keterangan intermediate menunjukkan bahwa pada lapisan yang terbentuk akibat erupsi berasal dari volume gas dan sifat magma yang tidak asam dan tidak basa. Pada daerah ini, kondisi geologi dan litologi penyusun lapisan batuan/tanah secara umum terdiri dari breksi, lava, tuf, yaitu batuan sedimen klastik yang terdiri dari fragmen batuan vulkanik yang menyudut (breksi) tertanam dalam matriks abu vulkanik (tuf). dan andesit-basal.

Berdasarkan kondisi tersebut, lapisan tanah penyusun lereng berasal dari batuan lapuk dan residual, serta mengandung mineral lempung. Lapisan jenis ini mudah menyimpan air, sehingga mudah mengalami kenaikan derajat kejenuhan yang dapat menyebabkan penurunan kuat geser tanah dan kenaikan berat massa tanah.

3.1.4. Hasil pengujian data tanah

Identifikasi dan klasifikasi jenis lapisan tanah ditentukan dari penyelidikan tanah yang menggunakan uji boring dan N-SPT. Selain itu dilakukan juga pengambilan sampel secara manual di beberapa titik untuk memvalidasi parameter tanah yang akan digunakan. Tujuan pengambilan sampel tanah ini adalah untuk mengetahui *index properties* dan *engineering properties* yang dimiliki oleh tanah di lapisan tersebut.

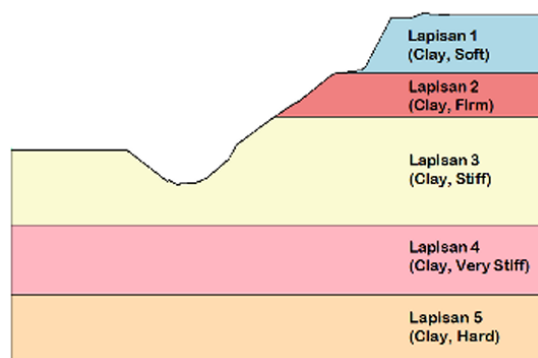
Berdasarkan hasil pengujian borlog dan uji lab, diketahui bahwa pada daerah ini di dominasi oleh tanah lempung hingga kedalaman 30 meter dengan tingkat kekakuan tanah yang cenderung terus meningkat. Muka air tanah berada kedalaman 6,8 meter.

Lapisan tanah dibagi menjadi 5 jenis lapisan seperti ditampilkan pada Gambar 6. Lapisan 1 memiliki tebal lapisan 5 meter. Lapisan ini memiliki nilai N-SPT yang berkisar di antara 4-5. Lapisan 2 memiliki tebal lapisan 4 meter dan rentang nilai N-SPT 5-9. Lapisan 3 merupakan lapisan paling tebal dengan tebal lapisan 9 meter dan nilai N-SPT 8-12. Lapisan 4 memiliki tebal lapisan 6 meter dengan rentang nilai N-SPT 12-32. Lapisan 5 memiliki tebal lapisan yang sama dengan Lapisan 4 yaitu tebal 6 meter dan memiliki nilai N-SPT 32-62.

Penentuan tingkat konsistensi tanah pada setiap lapisan didasarkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Konsistensi tanah lempung berdasarkan N-SPT

No	Konsistensi	N-SPT
1	Sangat lunak (<i>very soft</i>)	0-2
2	Lunak (<i>soft</i>)	2-4
3	Sedang (<i>firm</i>)	4-8
4	Kaku (<i>stiff</i>)	8-15
5	Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	15-30
6	Keras (<i>hard</i>)	>30



Gambar 5. Profil lapisan tanah pada potongan lereng.

Semua sampel tanah yang telah diuji memiliki jenis kelompok yang sama saat disesuaikan dengan klasifikasi berdasarkan AASHTO. Sampel tanah berada pada kelompok A-7-5, yang merupakan tanah berlempung dengan nilai sedang hingga jelek sebagai bahan dasar tanah. Hal ini terjadi dikarenakan semua sampel tanah memiliki nilai $PI > 11\%$ dan nilai $LL > 41\%$. Selain itu, semua jenis tanah memenuhi syarat $PI < LL - 30\%$.

Klasifikasi tanah berdasarkan USCS juga menunjukkan semua sampel tanah yang diuji berada pada kelompok MH. Sampel tanah masuk kedalam kode H karena nilai LL yang dimiliki lebih dari 50% . Kelompok ini merupakan jenis tanah Lempung/lanau anorganik dan Plastisitas tinggi

Penentuan parameter tanah pada tiap lapisan mengikuti hasil uji lab dan tetap melalui *engineering judgement*. Untuk parameter yang tidak ada dalam hasil uji lab seperti nilai modulus *young*, nilai parameter yang digunakan didapatkan dari berbagai korelasi para peneliti terdahulu. Hal ini dilakukan mengingat terbatasnya data di tiap lapisan yang diuji. Korelasi yang digunakan mengikuti panduan dari buku *Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik Dan Fondasi* (Kementrian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019) dan *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* (Look, 2014).

3.2 Pembebanan

Pembebanan merupakan aspek yang penting untuk dimasukkan dalam analisis, terutama pada arus lalu lintas diatas lereng. Pembebanan akan berpengaruh terhadap nilai stabilitas lereng dan deformasi yang terjadi pada jalan. Ada dua jenis pembebanan yang akan digunakan dalam analisis, yaitu pembebanan dengan beban kendaraan dan beban gempa.

3.2.1 Beban kendaraan

Pembebanan dengan beban kendaraan mengacu kepada kendaraan terberat yang melintas di atas lereng. Kendaraan terberat yang melintasi lereng tersebut adalah MAN TGS 40.440 varian *head trailer*. Kendaraan ini umumnya digunakan untuk membawa kebutuhan logistik perusahaan maupun keperluan lainnya.

Berdasarkan hasil perhitungan, beban terberat berada pada bagian depan truk dengan nilai $29,69 \text{ kN/m}$. Hasil tersebut akan digunakan dalam analisis lereng pada penelitian ini. Nilai pembebanan akan dibulatkan keatas menjadi 30 kN/m .

3.2.2 Beban gempa

Beban gempa yang digunakan adalah koefisien seismik horizontal yang didapatkan dari percepatan puncak di permukaan (PGA) dengan penentuan kelas situs dan faktor amplifikasi yang didapat dari Desain Spektra Indonesia.

Didapatkan nilai percepatan maksimum pada lokasi penelitian sebesar $0,5282 \text{ g}$. Lereng bukan merupakan material yang kaku dan secara umum percepatan puncak gempa terjadi dalam waktu yang singkat, maka dari itu koefisien seismik horizontal (K_h) yang umum digunakan sebesar minimal $1/3$ dari percepatan puncak horizontal dengan penentuan kelas situs dan faktor amplifikasi (Syah et al., 2020). Berdasarkan hal tersebut, nilai beban gempa yang digunakan dalam analisis sebesar $0,176 \text{ g}$.

3.3 Mekanisme longsoran

Berdasarkan hasil survei dan investigasi, dapat diketahui faktor pendorong dan pemicu terjadinya longsor. Faktor pendorong terjadinya longsoran adalah kondisi geomorfologi, kondisi geologi, hidrologi lereng, dan tata guna lahan.

Kondisi geomorfologi menunjukkan bahwa area longsor memiliki geometri lereng yang curam dan didominasi dengan lapisan lempung yang cukup tebal.

Kondisi geologi menunjukkan bahwa lapisan tanah pada kawasan ini terbentuk dari berbagai jenis mineral yang mudah menyimpan air.

Tata guna lahan pada lokasi dikarenakan tidak ada vegetative pada lereng. Penataan drainase pada area ini juga belum tersusun dengan baik ditunjukkan dengan tidak adanya drainase disekitar area jalan yang menyebabkan kondisi hidrologi lereng memburuk.

Faktor pemicu terjadinya longsor adalah curah hujan yang tinggi, aktivitas manusia, dan beban gempa. Faktor pemicu utama yang menyebabkan longsor pada area ini adalah curah hujan, longsor terjadi setelah hujan deras pada malam sebelumnya dan tidak adanya pengaruh akibat dari aktivitas manusia dan gempa pada saat itu.

Aliran air akibat hujan deras langsung melimpas ke atas jalan dan badan lereng, akibat tidak adanya drainase di sekitar jalan.

Kondisi ini menyebabkan erosi pada permukaan lereng. Selain itu, aliran air ini menyebabkan naiknya permukaan air tanah dan lapisan lempung menjadi jenuh. Lapisan lempung cenderung membutuhkan waktu yang lama untuk mengeluarkan kandungan air didalamnya, dan tidak adanya drainase yang memadai, akan mengurangi parameter kuat geser tanah yang merupakan salah satu faktor gaya penahan (*restraint force*) lereng.

Masuknya air pada badan lereng juga menjadi beban tambahan atau gaya pendorong (*driving force*) dan mengakibatkan berkurangnya nilai faktor keamanan (SF) lereng, dan puncaknya terjadi longsor pada area ini karena *driving force* yang diterima lebih besar daripada *restraint force* yang dimiliki.

Selain itu, limpasan air akibat hujan mengakibatkan naiknya debit sungai di kaki lereng yang dapat mengurangi kekuatan lereng dan akan berbahaya apabila tertimbun oleh material longsor.

Longsor yang terjadi merupakan jenis rotasional karena bidang longosr membentuk lengkungan dan hanya terdapat lapisan lempung pada badan lereng.

3.4 Analisis stabilitas lereng

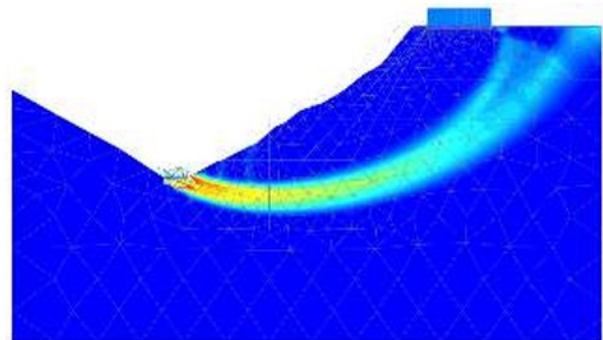
Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap kenaikan muka air tanah pada lereng, nilai SF yang dihasilkan

akan terus turun. $SF = 1$ dicapai ketika muka air tanah berada sejajar dengan lapisan tanah teratas. Model analisis ini juga menjadi validasi terhadap mekanisme longsoran Hal ini juga berbanding lurus dengan informasi yang didapat dari warga sekitar bahwa longsor terjadi ketika hujan deras melanda wilayah tersebut. Untuk beban lalu lintas dihitung berdasarkan beban kendaraan terberat yang melintas diatasnya, sehingga beban yang digunakan sebesar 30 kN/m.. Analisis stabilitas lereng terhadap peningkatan beban juga telah dilakukan, dan menghasilkan kesimpulan bahwa beban kendaraan tidak berpengaruh besar terhadap perubahan nilai faktor keamanan lereng. Ada atau tidak adanya penambahan lalu lintas tidak memiliki dampak signifikan terhadap resiko terjadinya longsor.

3.4.1 Analisis kondisi eksisting

Analisis eksisting dilakukan untuk mengetahui kondisi keamanan lereng yang sedang ditinjau. menggunakan software analisis stabilitas lereng berbasis *limit equilibrium* (Analisis kesetimbangan batas) atau disingkat LEM Bishop dan *Finite Elemen Methode* atau disingkat FEM. Pembebanan yang digunakan adalah beban kendaraan dan beban gempa. Beban kendaraan didapatkan dari berat kendaraan terberat yang melintas di atas jalan, bukan melalui standar yang telah ditetapkan. Hal ini dikarenakan wilayah ini merupakan wilayah yang sering dilewati oleh Kendaraan berat sehingga kegiatan lalu lintas yang berada di atas lereng berbeda dengan jalanan pada umumnya. Digunakan nilai beban kendaraan sebesar 30 kN/m. Untuk beban gempa yang digunakan adalah 0,176 g.

Hasil analisis dengan *Limit Equilibrium Method* (LEM) menghasilkan nilai keamanan sebesar 1,299 untuk beban statis, dan 1,025 untuk beban dinamik. Sedangkan analisis dengan *Finite Elemen Method* (FEM), menghasilkan nilai $SF = 1,176$ dengan beban statis, dan $SF = 1,057$ dengan beban dinamis.



Gambar 6. Bidang gelincir longsor pada analisis FEM.

Berdasarkan hasil analisis diatas, nilai SF pada lereng tidak memenuhi syarat lereng yang aman sesuai dengan SNI 8460 : 2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, dimana lereng dapat disebut aman apabila

nilai $SF \geq 1,5$ untuk beban statis, dan $SF \geq 1,1$ untuk beban dinamik. Maka dari itu perlu adanya perancangan perkuatan untuk menaikkan nilai keamanan dari lereng tersebut. Perancangan perkuatan sebaiknya harus memotong bidang gelincir pada kondisi $SF = 1$, dimana hal tersebut merupakan titik kritis suatu lereng. Hal ini diperlukan dengan tujuan untuk menaikkan nilai angka aman secara lebih optimal sehingga mencegah terjadinya longsor kembali.

3.5 Konsep desain penangan

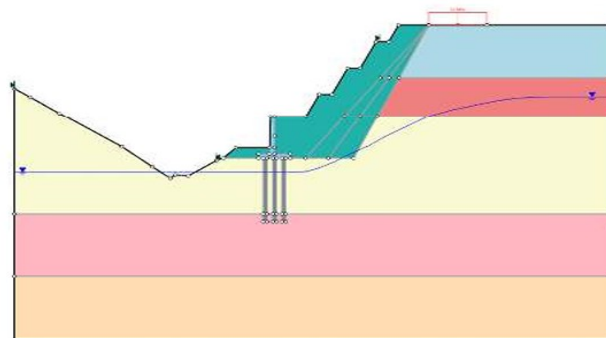
Analisis ini menggunakan 2 jenis perkuatan lereng yaitu dinding penahan tanah kombinasi *mini pile* serta dengan *sheet pile*. Perkuatan dinding penahan tanah dengan *mini pile* dan *sheet pile* merupakan perkuatan struktural yang akan menahan gerakan massa tanah pada bidang gelincir dibawah lereng. Selain itu, pada kedua jenis perkuatan ini akan diberikan tambahan timbunan dibelakang struktur. Penambahan timbunan ini bertujuan sebagai *counter weight* atau penyeimbang gaya yang akan mereduksi pergerakan tanah dari lapisan asli mengingat parameter tanah asli pada area tersebut cukup buruk. Timbunan direncanakan dengan kemiringan 1:2 dilengkapi dengan *benching* setinggi 2,5 meter dan *berm*. Penanaman rumput vetiver juga ditambahkan di sepanjang area permukaan timbunan. Hal ini bertujuan untuk mengurangi dampak dari erosi permukaan akibat aliran air dan mencegah infiltrasi air yang berlebihan ke dalam badan lereng.

3.6 Analisis menggunakan perkuatan dinding penahan tanah dengan mini pile

Perencanaan desain dinding penahan tanah didasarkan pada SNI 8460 : 2017 dengan sedikit penyesuaian pada bagian struktur horizontal. Hal ini dikarenakan adanya penambahan *mini pile* pada perkuatan sehingga struktur horizontal pada dinding penahan tanah juga dianggap sebagai *pile cap*. Dinding penahan tanah direncanakan memiliki tinggi 4 meter dengan menggunakan mutu beton K-350. Mutu tersebut dipilih karena untuk dinding penahan tanah ini akan digunakan tulangan besi (beton bertulang) di dalam strukturnya.

3.6.1 Analisis kapasitas lateral tiang

Mini pile yang digunakan berjenis *square pile*, dengan spesifikasi *pile* akan berdasarkan katalog produk *precast*



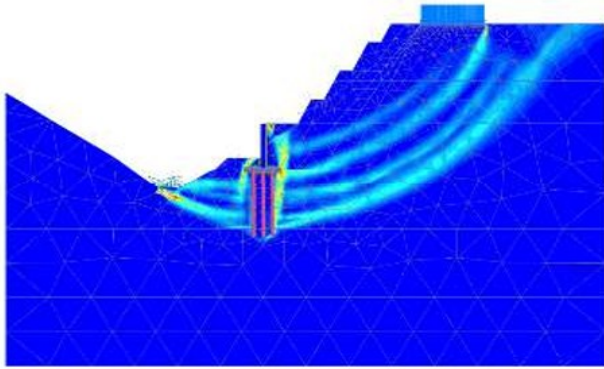
Gambar 7. Rencana desain perkuatan lereng dengan DPT + *mini pile*

Berikut adalah hasil rekapitulasi nilai SF yang diperoleh menggunakan aplikasi.

Tabel 3. Rekapitulasi Nilai SF Setiap Phase DPT + *Mini pile*

No	Perkuatan Dinding Penahan Tanah + <i>Mini pile</i>	FEM (SF)
1	Eksisting	1,176
2	Eksisting + Gempa	1,057
3	Galian Lapisan 1	1,411
4	Galian Lapisan 2	1,296
5	Galian Lapisan 3	1,113
6	Konstruksi Dinding Penahan Tanah + <i>Mini pile</i>	1,205
7	Timbunan 1	1,298
8	Timbunan 2	1,57
9	Desain Perkuatan	1,573
10	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan	1,507
11	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan + Beban Gempa	1,122

Berdasarkan hasil analisis, didapat bahwa selama proses konstruksi, terutama pada saat tahap galian, nilai SF yang dihasilkan selalu lebih besar dari nilai kritis lereng ($SF = 1$) bahkan cenderung lebih besar dibandingkan dengan nilai SF kondisi eksisting. Oleh karena itu, maka proses konstruksi ini dapat dinyatakan aman untuk dilakukan. SF akhir perkuatan menggunakan dinding penahan tanah dan juga *mini pile* dengan tambahan beban kendaraan adalah 1,507 dan saat ditambah beban gempa menghasilkan nilai sebesar 1,122.



Gambar 8. Bidang gelincir pada perkuatan DPT + *Mini pile*

Pada saat analisis *Limit Equilibrium Method (LEM)*, ditemukan terdapat keterbatasan Pada Analisis Komputasi tidak bisa memodelkan perkuatan lebih detail.

Berikut adalah hasil rekapitulasi nilai SF (Metode LEM)

Tabel 4. Rekapitulasi Nilai SF Setiap *Phase* DPT + *Mini pile*

No	Perkuatan Dinding Penahan Tanah + <i>Mini pile</i>	LEM (SF)
1	Eksisting	1,298
2	Eksisting + Gempa	1,025
3	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan	1,571
4	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan + Beban Gempa	1,162

yang diperoleh menggunakan aplikasi Hasil analisis LEM menunjukkan bahwa setelah diberikan perkuatan nilai SF mengalami kenaikan. Nilai SF yang sebelumnya 1,298 pada kondisi statis dan 1,025 pada kondisi dinamis, menjadi 1,571 pada kondisi statis dan 1,162 pada kondisi dinamis setelah diberi perkuatan. Nilai ini mengindikasikan bahwa perkuatan lereng dengan kedua aplikasi tersebut telah memenuhi syarat aman berdasarkan SNI 8460 : 2017, bahwa lereng (maupun perkuatannya) dianggap aman apabila nilai stabilitas global $SF \geq 1,5$ untuk kondisi statis, dan $SF \geq 1,1$ untuk kondisi dinamis.

Rekapitulasi berat dan momen dinding penahan tanah ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 5. Rekapitulasi berat dan momen dinding penahan tanah

Bidang	Berat (kN)	Jarak (m)	Momen (kNm)
1	25,92	1,12	29,0304
2	4,32	0,9367	4,0464
3	24,864	1,295	32,1988
4	76,296	1,93	147,25128
Total	131,4		212,52696

Setelah dilakukan perhitungan, didapati bahwa desain *retaining wall* memenuhi setiap syarat faktor keamanan yang telah ditetapkan sesuai SNI 8460 : 2017. Oleh karena itu desain perkuatan *retaining wall* ini dapat dikatakan aman.

3.6.2 Analisis deformasi DPT + *mini pile*

Analisis deformasi dilakukan untuk mengetahui berapa nilai perpindahan maksimum yang dialami oleh struktur perkuatan. hal ini bertujuan untuk memastikan perubahan bentuk pada struktur yang terjadi pada struktur tetap memenuhi standar izin yang telah ditentukan.

Deformasi yang dialami oleh struktur perkuatan dinding adalah 4,307 cm, sedangkan untuk nilai deformasi yang dialami *mini pile* adalah 2,903 mm.

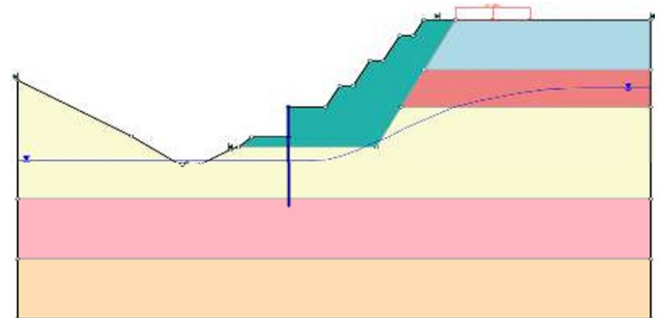
Berdasarkan hasil tersebut, maka struktur perkuatan ini memenuhi syarat deformasi yang diizinkan yaitu untuk struktur dinding nilai toleransi deformasi maksimum

3.7 perkuatan dengan *sheet pile*

Sheet pile yang digunakan berjenis FCSP (*Flat Concrete Sheet Pile*), dengan spesifikasi akan berdasarkan katalog produk precast dari PT. Waskita Precast

3.7.1 Stabilitas perkuatan lereng dengan *sheet pile*

Analisis stabilitas global pada lereng akan dilakukan dengan menggunakan bantuan aplikasi. Rencana desain perkuatan lereng ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 9. Rencana desain perkuatan lereng dengan *sheetpile*

Berikut adalah hasil rekapitulasi nilai SF setiap *phase sheetpile*

Tabel 6. Rekapitulasi Nilai SF Setiap *phase sheetpile*

No	Perkuatan Sheet Pile	FEM (SF)
1	Eksisting	1,176
2	Eksisting + Gempa	1,057
3	Galian Lapisan 1	1,411
4	Galian Lapisan 2	1,296
5	Galian Lapisan 3	1,113
6	Konstruksi <i>sheetpile</i>	1,311

7	Timbunan 1	1,297
8	Timbunan 2	1,511
10	Desain Perkuatan	1,622
11	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan	1,524
12	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan + Beban Gempa	1,103

Berdasarkan hasil analisis, didapat bahwa selama proses konstruksi, terutama pada saat tahap galian, nilai SF yang dihasilkan selalu lebih besar dari nilai kritis lereng ($SF = 1$) bahkan cenderung lebih besar dibandingkan dengan nilai SF kondisi eksisting. Oleh karena itu, maka proses konstruksi ini dapat dinyatakan aman untuk dilakukan. SF akhir perkuatan menggunakan *sheet pile* dengan tambahan beban kendaraan adalah 1,524, dan saat ditambah beban gempa menghasilkan nilai sebesar 1,103.

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai SF Setiap *Phase Sheet Pile*

No	Perkuatan Dinding Penahan Tanah + <i>Mini pile</i>	LEM (SF)
1	Eksisting	1,298
2	Eksisting + Gempa	1,025
3	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan	1,572
4	Desain Perkuatan + Beban Kendaraan + Beban Gempa	1,188

Pada hasil analisis dari Komputasi LEM, didapat bahwa nilai SF lereng mengalami peningkatan setelah diberi perkuatan. Nilai SF yang dihasilkan adalah 1,572 pada kondisi statik dan 1,188 pada kondisi dinamik. Hasil ini menunjukkan perkuatan lereng dengan analisis melalui kedua aplikasi tersebut telah memenuhi syarat aman berdasarkan SNI 8460 : 2017, bahwa lereng (maupun perkuatannya) dianggap aman apabila $SF \geq 1,5$ untuk kondisi beban statik, dan $SF \geq 1,1$ untuk kondisi beban dinamis.

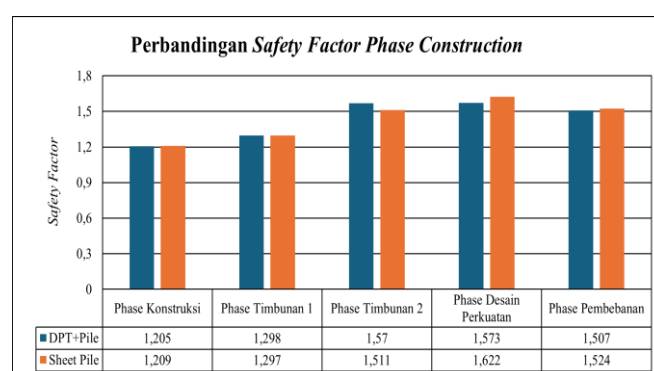
3.7.2 Analisis deformasi pada *sheetpile*

Berdasarkan hasil analisis FEM, didapatkan bahwa deformasi yang dialami oleh *sheet pile* adalah 6,317 mm. Nilai deformasi ini belum melampaui batas izin yang telah ditetapkan SNI 8460 : 2017 yaitu sebesar 0,005 H, dengan panjang perkuatan *sheet pile* yaitu 13 meter yang berarti nilai deformasi yang diizinkan adalah 65 mm. Oleh karena itu, struktur perkuatan menggunakan *sheet pile* ini aman untuk digunakan.

3.8 Stabilitas Lereng tahap Phase Konstruksi

Nilai stabilitas lereng meningkat setelah diberi perkuatan. Baik analisis menggunakan FEM maupun LEM (Metode Bishop), keduanya menunjukkan bahwa

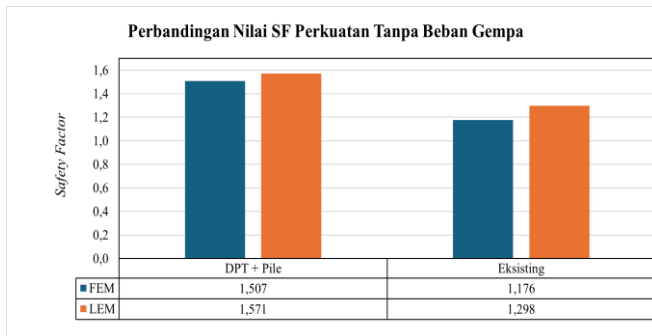
nilai faktor keamanan lereng setelah diberi perkuatan memenuhi syarat yang telah ditetapkan dalam SNI Persyaratan Perancangan Geoteknik, dimana nilai faktor keamanan lereng harus lebih besar dari 1,5 pada kondisi statis. Dalam kondisi dinamis, yaitu dengan adanya penambahan beban gempa dan dengan menggunakan metode pseudo-statik, nilai faktor keamanan yang dicapai harus lebih besar dari 1,1. Pada analisis stabilitas lereng menggunakan FEM, stage construction pada setiap perkuatan dilakukan secara bertahap, dari kondisi eksisting hingga tahap akhir pemasangan perkuatan. Secara umum selama *phase construction* nilai SF yang dihasilkan setiap perkuatan cenderung meningkat. Grafik perbandingan *phase construction* masing-masing perkuatan dapat dilihat di **Gambar 10**.



Gambar 10. Perbandingan nilai SF perkuatan dengan FEM

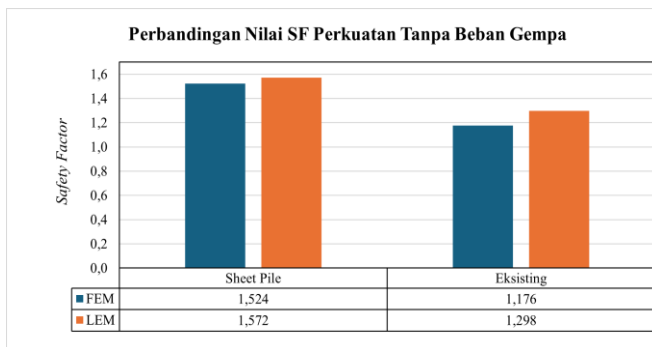
Phase konstruksi perkuatan dinding penahan tanah dan *sheet pile* nilai SF cenderung mendekati sama. Pada phase Konstruksi dan Phase pembebanan nilai safety factor (SF) Sheet Pile cenderung lebih baik dibandingkan dengan menggunakan DPT + Mini Pile, walaupun nilainya tidak jauh berbeda.

Nilai SF yang dihasilkan cenderung terus meningkat di setiap proses konstruksi yang dilalui oleh setiap perkuatan. Kenaikan SF ini berhenti di *phase construction*, dimana pada tahap ini semua desain perkuatan telah dibangun hingga selesai. Terlihat bahwa perkuatan dinding penahan tanah dengan *mini pile* memiliki nilai tertinggi pada tahap ini. Penurunan SF kembali terjadi di *phase construction* ke 9. Pada tahap ini, setiap desain perkuatan diberikan beban kendaraan di atasnya sebesar 30 kPa. Penambahan beban ini menyebabkan penurunan nilai SF dari setiap perkuatan.



Gambar 11. Nilai SF perkuatan DPT + *pile* tanpa beban gempa

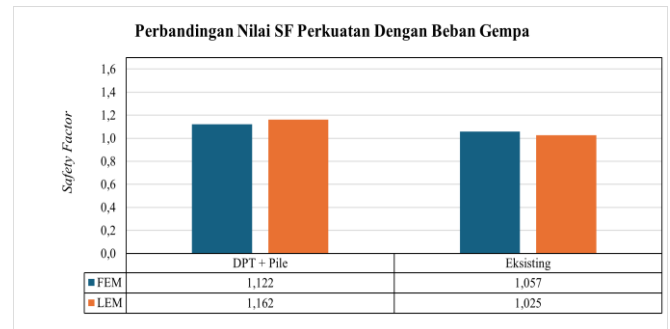
Hasil Analisis tanpa beban gempa pada gambar 11 dapat di jelaskan pada Kondisi Existing Metode FEM Lebih kecil SFnya dibandingkan dengan Metode LEM begitu pula setelah menggunakan DPT+Mini Pile Metode FEM Lebih Kecil Nilai SFnya dibandingkan dengan Metode LEM. Peningkatan Nilai Angka Aman (SF) dapat terlihat dari kondisi pasca longsor (Kondisi Existing) dan setelah penanganan menggunakan perkuatan DPT+Mini Pile



Gambar 12. Perbandingan nilai SF perkuatan *sheet pile* tanpa beban gempa

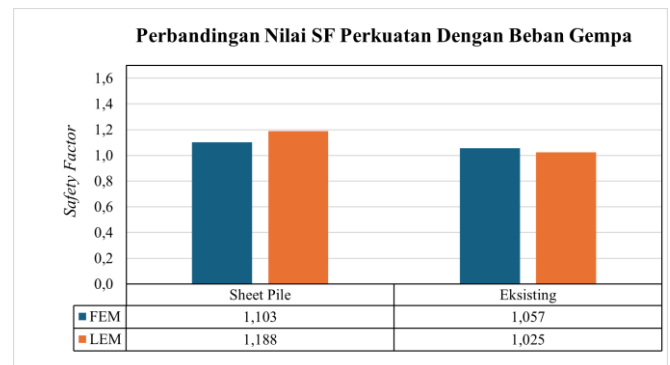
Hasil Analisis tanpa beban gempa pada Gambar 12 dapat di jelaskan pada Kondisi Existing Metode FEM Juga Lebih kecil SFnya dibandingkan dengan Metode LEM begitu pula setelah menggunakan Sheet Pile Metode FEM Lebih Kecil Nilai SFnya dibandingkan dengan Metode LEM. Peningkatan Nilai Angka Aman (SF) dapat terlihat dari kondisi pasca longsor (Kondisi Existing) dan setelah penanganan menggunakan perkuatan Sheet Pile

Dari Gambar 11 dan Gambar 12 Penggunaan Konstruksi Perkuatan DPT+Mini Pile dibandingkan dengan Penggunaan Konstruksi Sheet Pile dengan beban Statis (beban tanpa gempa) dapat dijelaskan bahwa penggunaan Sheet Pile baik menggunakan analisis Metode FEM dan Analisis Metode LEM Lebih baik tingkat keamanannya dibandingkan menggunakan DPT+Mini Pile, walaupun tidak terlalu signifikan.



Gambar 13. Perbandingan nilai SF perkuatan DPT + *Pile* dengan beban gempa.

Hasil Analisis dengan beban gempa pada gambar 13 dapat di jelaskan pada Kondisi Existing Metode FEM dan Metode LEM lereng dalam kondisi tidak aman dan berpotensi longsor kembali akibat dari beban kendaraan dan gempa. setelah menggunakan DPT+Mini Pile , potensi longsor menjadi rendah dikarenakan factor aman meningkat diatas nilai angka aman minimal yaitu diatas 1,1 atau $SF \geq 1,1$ Peningkatan Nilai Angka Aman (SF) dapat terlihat dari kondisi pasca longsor (Kondisi Existing) dan setelah penanganan menggunakan perkuatan DPT+Mini Pile



Gambar 14. Perbandingan nilai SF perkuatan *sheet pile* dengan beban gempa.

Hasil Analisis dengan beban gempa pada gambar 14 dapat di jelaskan pada Kondisi Existing Metode FEM dan Metode LEM lereng dalam kondisi tidak aman dan berpotensi longsor kembali akibat dari beban kendaraan dan gempa. setelah menggunakan Sheet Pile , potensi longsor menjadi berkurang dikarenakan factor aman meningkat diatas nilai angka aman minimal yaitu diatas 1,1 atau $SF \geq 1,1$ Peningkatan Nilai Angka Aman (SF) dapat terlihat dari kondisi pasca longsor (Kondisi Existing) dan setelah penanganan menggunakan perkuatan Sheet Pile

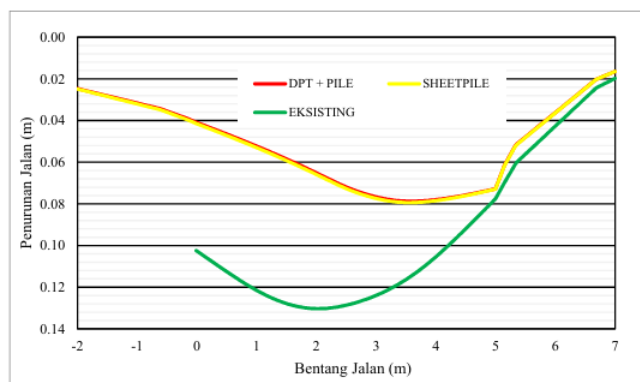
Kedua jenis perkuatan ini sudah memenuhi nilai standar aman untuk stabilitas lereng yang telah ditetapkan di SNI 8460:2017 dimana suatu lereng dapat dinyatakan aman apabila nilai SF memiliki nilai lebih besar dari 1,5 pada kondisi statis atau kondisi tanpa beban gempa dan lebih besar dari 1,1 pada saat kondisi dinamis (ada gempa).

Hasil analisis menggunakan Analisis *Finite Element Metode* (FEM) dan *Limit Equalibrium Metode* (LEM) secara umum tidak memiliki perbedaan yang signifikan, meskipun metode analisis yang dimiliki berbeda. Dalam menganalisis suatu

keruntuhan lereng. Kedua metode ini dapat saling memverifikasi satu sama lain untuk mendapatkan hasil akhir analisis lereng yang ideal.

3.9 Perbandingan deformasi pada jalan raya

Hasil analisis mengenai perbandingan penurunan jalan terhadap masing-masing perkuatan lereng ditampilkan dalam grafik berikut.



Gambar 15 perbandingan penurunan jalan terhadap masing-masing perkuatan lereng.

Nilai penurunan yang dihasilkan cukup besar mengingat pembebanan lalu lintas yang digunakan tidak mengacu kepada SNI 8460 : 2017 yang memiliki nilai maksimum untuk beban lalu lintas yaitu sebesar 15 kN/m^2 pada kategori kelas Jalan A. Pembebanan yang digunakan mengacu terhadap beban kendaraan terberat yang melintas di daerah ini mengingat jalan Simpang Mio merupakan satu-satunya akses keluar masuk kendaraan berat milik PT. Supreme Energy dengan beban kendaraan yang digunakan adalah 30 kN/m^2 , sehingga nilai beban yang digunakan dua kali lipat dari pembebanan yang dianjurkan oleh SNI.

Pada kondisi eksisting, penurunan jalan maksimum yang terjadi adalah sebesar 13,037 cm, dengan pusat penurunan terbesar berada di area jalan yang berada di pinggir lereng atau telah mengalami kerusakan akibat longsor. Perilaku penurunan yang dihasilkan berbentuk cenderung seperti persamaan kuadrat. Hal ini terjadi dikarenakan tanah yang berada dibawah lapisan jalan hanya 1 lapisan tanah yang sejenis, yaitu lapisan tanah 1 yang didominasi dengan lempung lunak.

Untuk penurunan jalan setelah diberikan perkuatan, perilaku deformasi dan pusat penurunan terbesar cenderung memiliki pola yang sama meskipun memiliki nilai yang berbeda. Untuk penurunan jalan yang terjadi pada perkuatan dinding penahan tanah dengan *mini pile* dan *sheet pile* masing-masing sebesar 7,878 cm dan 7,941 cm.

Perilaku penurunan terbesar jalan berada pada bentang 3-4 meter. Hal ini diakibatkan lapisan tanah yang berada dibawah jalan pada bentang tersebut berbeda dibandingkan pada bentang 1-3 meter. Pada bentang 1-3 meter, lapisan tanah yang digunakan dibawah jalan

sudah diganti dengan tanah timbunan. Perbedaan ini terjadi akibat adanya perbedaan lapisan tanah, dimana pada bentang 1-3 meter digunakan tanah timbunan yang tentu saja memiliki parameter lebih baik daripada lapisan 1, sehingga mampu menahan beban jalan yang diberikan secara lebih baik. Selain itu, pada bagian tanah di sisi ujung jalan, terjadi perilaku berupa alur (*rutting*) atau amblas (*great depression*) dimana pada area tersebut deformasi yang dialami tidak merata. Pada bagian jalan menuju tanah asli, terjadi penurunan yang berbeda akibat beban jalan yang sangat besar dan hanya menekan lapisan aspal ke bawah, sehingga lapisan tanah yang berada di sebelahnya mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Hal ini terjadi karena jalan dan tanah bukan suatu lapisan yang homogen dan adanya perbedaan parameter.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil investigasi geoteknik pada area longsor Jalan Lahat-Simpang Mio menunjukkan bahwa jenis tanah yang berada di area longsor didominasi oleh tanah lempung dan dibagi menjadi 5 lapisan tanah. Lapisan 1 dengan kedalaman 0-5 meter lempung lunak. Lapisan 2 dengan kedalaman 5-9 meter berjenis lempung sedang. Lapisan 3 dengan kedalaman 9-18 meter berjenis lempung kaku. Lapisan 4 dengan kedalaman 18-24 meter berjenis lempung sangat kaku. Lapisan 5 dengan kedalaman 24-30 meter berjenis lempung keras. Muka air tanah berada pada kedalaman 6,8 meter dari permukaan jalan.
2. Penyebab longsor pada area tersebut adalah curamnya geometri lereng, naiknya muka air tanah akibat hujan deras, dan lapisan tanah dasar jalan yang buruk.
3. Pada kondisi eksisting, nilai SF pada lereng tanpa beban gempa dengan analisis menggunakan Metode LEM dan analisis dengan FEM tidak aman terhadap potensi longsor lanjutan. Sedangkan dengan beban gempa berdasarkan hasil dari Analisis Metode LEM, dan Analisis Metode FEM kondisi dapat lebih buruk karena nilai angka amannya menjadi dibawah syarat minimum sehingga dapat memicu longsor kembali. Penurunan pada jalan yang terjadi pada kondisi eksisting sebesar 13,037 cm.
4. Nilai stabilitas lereng dan deformasi setelah menggunakan perkuatan pada masing-masing struktur perkuatan memenuhi standar yang berlaku yaitu SNI 8460 : 2017.
5. *Phase construction* di setiap perkuatan memiliki nilai SF yang berbeda-beda. Nilai SF yang dihasilkan pada *phase construction* setiap perkuatan cenderung aman ($SF > 1,25$).
6. Alternatif perkuatan yang ditawarkan adalah menggunakan DPT + *Mini pile* dan *sheet pile* Kedua perkuatan dapat direkomendasikan untuk alternatif perkuatan lereng di area tersebut karena memenuhi syarat stabilitas lereng.

Daftar Pustaka

- Adhimix PCI Indonesia. (n.d.). *Precast Pile*.
- Badan Standardisasi Nasional, 2017. *SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik*, Jakarta: BSN.
- Chen, S. C., Lin, T. W., Chen, C.Y. (2015). Modeling of Natural dam Failure Models and DownstreamRiverbed Morphological Changes with Different Dam Materials in a Fume Test. *Engineering Geology*, 188, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.016>
- Hardiyatmo, H.C. 2012. *Penanganan Tanah Longsor dan Erosi*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga. (2019). *Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik Dan Fondasi*.
- Liu, G., Tong, Fg., Zhao, Yt. (2018). A force transfer mechanism for triggering landslides during rainfall infiltration. *Journal Of Mountain Science* 15, 2480–2491. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5043-x>
- Look, B. G. (2014). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. CRC Press.
- Nanda, T. N. F. and Hamdhan I. N. (2016). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D. *Jurnal Reka Racana*, 2(4), 148- 159.
- Plummer, (2007). *Physichal Geology* 11th Edition. New York: McGraw-Hill.
- Republik Indonesia, (2007). Undang-undang RI No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2007 Nomor 66. Jakarta.
- Rijalullah, M., Shida Natul, A., & Shalihat, K. (2023). Pemetaan Kerentanan Tanah Longsor di Kabupaten Lahat. 12.
- Syah, A., Dani, I., & Erfani, S. (2020). *Kombinasi Metode Kontrol dan Perkuatan untuk Penanganan Longsor (Studi Kasus: Longsor Waikerap, Tanggamus, Lampung)*.
- Syah, A., Siregar, A. M., & Wijaya, R. C. (2024). *Debris flow modeling and its mitigation: A case study in Semaka*. 2970, 020012. <https://doi.org/10.1063/5.0208267>
- Zhang, L. (2017). *Engineering Properties For Rocks (Vol. 4)*