



Deformasi Timbunan *Underpass* KM 41 + 00 Jalan *Bypass Bill* Mandalika

Muhammad Amrullah^{1*}, Sukandi¹, I Gede Utama Hadi Sutrisna¹

¹ Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sains Dan Terapan, Universitas Pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1232>

Article Info:

Received : 03 Januari 2026
Revised : 19 Januari 2026
Accepted : 17 Februari 2026
Published : 26 Februari 2026

Correspondence:

Muhammad Amrullah

Phone: +6281936364283

Abstract: This study aims to analyze the slope stability and behavior of expansive clay soil at the underpass site located at KM 41+00 of the Bypass Mandalika road using a numerical simulation approach with PLAXIS 2D software. The study area is characterized by flat geomorphology with a slope inclination of less than 40.3° and surface geology consisting of expansive clay deposits from alluvium, which exhibit significant shrink-swell behavior due to moisture variation. A geotechnical investigation was conducted using hand auger drilling to a depth of 2 meters, followed by laboratory testing to determine physical and mechanical soil properties such as moisture content, specific gravity, cohesion, and internal friction angle. These parameters were then used as input data for the numerical modeling. Simulations were performed under two conditions: existing conditions and post-consolidation after four years under a 20-ton vehicular load. The results indicated that vertical deformation increased from 5.06 mm to 10.74 mm, while horizontal deformation rose from 7.05 mm to 15.46 mm. The slope safety factor improved from 1.39 to 1.59 after consolidation, indicating that the slope remains stable. However, periodic monitoring and potential slope reinforcement are recommended to ensure long-term stability, especially under conditions of heavy rainfall or high traffic loads.

Keywords: Expansive clay; Slope stability; PLAXIS 2D; Consolidation; Safety factor.

Citation: Amrullah, M., Sukandi, & Hadi Sutrisna, I. G. U. . (2026). Deformasi Timbunan Underpass Km 41 + 00 Jalan Bypass Bill Mandalika . *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(1), 730-737. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1232>

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur merupakan satu hal yang diperhatikan dalam memajukan perekonomian suatu wilayah. Berdasarkan laporan dari Bank Dunia pada tahun 2015 menyatakan bahwa elastisitas PDB (Produk Domestik Bruto) terhadap infrastruktur di suatu negara berkisar antara 0,07 sampai dengan 0,44 (Amsal, 2020). Infrastruktur tak hanya dilihat dari pembangunan fasilitas pelayanan dasar pada sektor ekonomi, pendidikan dan kesehatan. Akan tetapi dalam bidang transportasi seperti pembangunan jalan dan jembatan, sebagai salah satu akses potensial dalam meningkatkan produktivitas masyarakat yang tinggi dapat tercapai (Munawaroh dkk., 2021).

Provinsi NTB beberapa tahun terakhir, terlebih setelah dibangunnya Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika dan pemulihan akibat gempa di Pulau Lombok tahun 2018. Pembangunan KEK Mandalika

mendorong pembangunan infrastruktur jalan dan transportasi yang lebih masif dan merata untuk mendukung kegiatan perekonomian di KEK Mandalika (DPMPTSP NTB, 2020). Masifnya pembangunan infrastruktur di NTB tentu tak terlepas dari beberapa kendala terutama kondisi jalan yang mengalami perubahan pada timbunan. Dalam perencanaan suatu konstruksi harus dilakukan penyelidikan terhadap karakteristik dan kekuatan tanah terutama sifat-sifat tanah yang mempengaruhi daya dukung tanah dalam menahan beban konstruksi di atasnya.

Apabila suatu konstruksi dibangun di atas tanah dasar yang memiliki daya dukung rendah maka diperlukan teknik dan cara khusus untuk meminimalisir dampak yang diakibatkan oleh kondisi tanah tersebut. Salah satu cara yang umum dilakukan untuk mendapatkan sifat tanah yang baik adalah dengan melakukan stabilisasi tanah, sebab pada tanah inilah

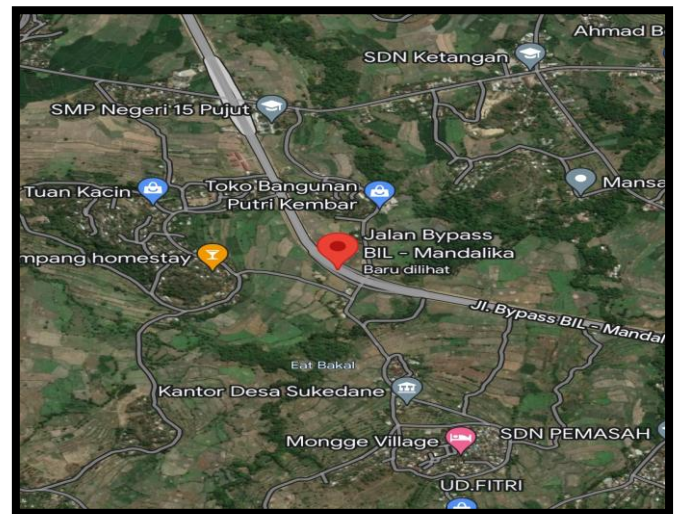
suatu konstruksi bertumpu. Namun, tidak semua tanah baik digunakan dalam bidang konstruksi, karena ada beberapa jenis tanah dasar yang bermasalah baik dari segi daya dukung tanahnya maupun dari segi (deformasi) tanahnya. Salah satu jenis tanah yang bermasalah ialah tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif mempunyai kembang susut yang tinggi. Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang memiliki sifat kembang susut yang besar dan prilakunya sangat dipengaruhi oleh air, tanah yang memiliki fluktuasi kembang susut yang tinggi disebut tanah lempung ekspansif.

Tanah didefinisikan sebagai material dasar yang sangat berpengaruh pada konstruksi suatu bangunan. Tanah memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda beda pada setiap lokasi. Tidak semua tanah memiliki daya dukung yang bagus, banyak pula tanah dengan kandungan mineral yang tidak kuat sehingga tidak mampu menahan beban yang berada di atasnya. Berdasarkan ukuran partikel terdapat beberapa jenis tanah yaitu kerikil (gravel), pasir (sand), lanau (silt), dan lempung (clay), tergantung dari ukuran partikel paling dominan yang terdapat pada tanah tersebut. Jenis tanah yang banyak terdapat di Indonesia salah satunya adalah tanah lempung. Tanah lempung dibagi menjadi dua jenis, yaitu tanah lempung non ekspansif dan lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif merupakan jenis tanah lempung yang tergolong ke dalam jenis tanah kurang baik yang memiliki daya dukung rendah serta mempunyai sifat kembang susut yang besar. Sifat kembang dan susut pada tanah lempung ekspansif tidak rata dari satu titik ke titik yang lain.

Hal tersebut menimbulkan adanya perbedaan ketinggian pada tanah yang semula rata menjadi tidak rata, serta akan berakibat kerusakan pada struktur di atasnya (Gustin & Ridwan, 2017). Dari uraian-uraian diatas, proyek pembngnsn jalan bypass bill mandalika adalah salah satu objek yang menjadi perhatian ,terkait dengan permasalahan atau kerusakan yang terjadi pada jalan. Maka pada penelitian ini, penulis tertarik melakukan penelitian dengan judul "Deformasi Timbunan Underpass Km 41+00 Jalan Bypass Bill Mandalika.

Metode

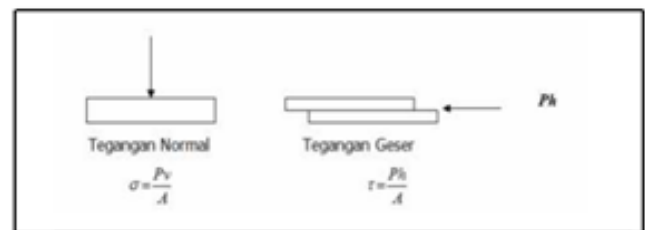
Kegiatan penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Januari sampai dengan Februari 2023 yang bertempat dikawasan jalan bypass bil mandalika. Secara geografis lokasi kegiatan penelitian tugas akhir terletak pada $08^{\circ} 45' 70.3''$ LS dan $116^{\circ} 08' 92.9''$ BT, dengan elevasi 324 m. Topografi area kegiatan penelitian merupakan perbukitan yang tidak jauh dari lautan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif, dengan tahapan proses kegiatan seperti yang ditunjukkan pada bagan alir (Gambar 2).



Gambar 2. Gaya Pada Uji Geser Langsung

Tahap awal yang dilakukan adalah studi literatur untuk mengumpulkan data sekunder, seperti data fisiografi wilayah, data geologi, dan informasi lain yang relevan dengan lokasi penelitian. Selanjutnya dilakukan pengambilan data primer melalui observasi lapangan guna memperoleh gambaran umum lokasi, pengambilan sampel tanah menggunakan bor tangan (hand bor), serta pengukuran topografi dengan alat theodolit. Data primer tersebut kemudian diuji di laboratorium untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik tanah. Data yang diperoleh, baik sekunder maupun primer, digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan parameter input dalam perhitungan analitis maupun simulasi numerik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D.

Sampel tanah diambil pada dua titik lokasi dengan kedalaman masing-masing satu meter menggunakan bor tangan. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam plastik dan diberi label sesuai kedalaman. Pengujian di laboratorium meliputi: (a) uji kadar air tanah sesuai standar ASTM D2216-92, (b) uji berat jenis tanah berdasarkan ASTM D854-92, (c) uji berat isi tanah dengan standar ASTM D2049, (d) analisis

saringan dan hidrometer untuk distribusi ukuran butir tanah berdasarkan ASTM D421-85 dan ASTM D422-85, serta (e) uji kuat geser langsung dalam kondisi drained untuk mendapatkan parameter kekuatan geser tanah berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Hasil pengujian digunakan untuk membuat grafik amplop kuat geser tanah guna menentukan nilai c dan ϕ secara lebih akurat.

$$\sigma = c + \sigma_n \tan \phi$$

Keterangan:

σ = kekuatan geser dalam tanah c = kohesi tanah

σ_n = tegangan normal bidang geser

ϕ = sudut geser dalam tanah

Pemodelan Menggunakan Software

Software plaxis merupakan program 2 dimensi yang digunakan untuk menganalisis deformasi dan stabilitas lereng. Setelah data primer dan sekunder terkumpul maka akan dilakukan pemodelan analisis deformasi dan stabilitas lereng untuk mengetahui keamanan lereng. Yang menjadi data input pemodelan adalah data - data hasil uji laboratorium dan data sekunder terkait lainnya. Gambar 2. Gaya Pada Uji Geser Langsung Adapun tahap - tahap pemodelan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

Pemodelan Numeris

Untuk membuat sebuah model numeris diperlukan adanya perlapisan tanah/batuandasar, geometri lereng serta parameter input model. Geometri lereng dibuat berdasarkan crosssection hasil topografi, sedangkan perlapisan tanah/batuan dari hasil pemboran lapangan dan uji laboratorium. Untuk parameter input model dengan memperhatikan deskripsi jenis tanah hasil uji lapangan dan laboratorium. Langkah-langkah penggambaran model geometri ke bidang gambar dengan Plaxis disesuaikan dengan koordinat yang telah ditetapkan seperti berikut:

1. Tanah/batuan dasar, tanah urugan/timbunan, digambarkan dengan model plane strain 2D, menggunakan model material tipe keruntuhan Mohr- Coulomb dan kondisi drained tergantung jenis tanah. Input parameter tanah yang dibutuhkan adalah berat volume basah (γ_{wet}), berat volume jenuh (γ_{sat}), koefisien permeabilitas (k_x, k_y), modulus elastisitas (E), kohesi (c), sudut gesek dalam (ϕ), Poisson ratio (ν) dan sudut dilatasi (ψ). Semua parameter input diperoleh dari hasil uji lapangan dan laboratorium serta nilai pendekatan secara empiris dan analitis.
2. Jika kondisi tanah/batuan dasar mempunyai nilai properties yang berbeda, maka geometri

dibagi dan dikelompokkan sesuai dengan nilai properties yang sama kemudian nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam parameter input data.

3. Sesudah model geometri dan parameter input selesai dibuat, lalu dilakukan finite element mesh yang di generate secara otomatis oleh Plaxis. Model akan dibagimenjadi elemen-elemen segitiga yang sesuai dengan elemen struktur. Proses generate didasarkan pada prinsip triangulasi, yaitu mencari nodal-nodal dengan nilai optimum sehingga hasilnya dapat berbentuk jaring segitiga yang tidak teratur.
4. Setelah tahap meshing yang di generateselesai, maka dilanjutkan dengan tahap calculation terhadap tahapan konstruksi serta kemungkinan terjadinya deformasi akibat setiap tahap tersebut.
5. Dari hasil analisis numeris dapat diketahui nilai deformasi dan nilai faktor aman yang terjadi dalam tanah/batuan.

Simulasi Numeris Dengan Plaxis

Untuk mengetahui perilaku deformasi lereng dan tanah/batuan dasar, maka dilakukan beberapa simulasi berikut: 1. Simulasi terhadap kondisi awal sebelum dan sesudah penambahan beban kendaraan; 2. Simulasi terhadap stabilitas lereng eksisting dan saat mengalami konsolidasi

Hasil dan Diskusi

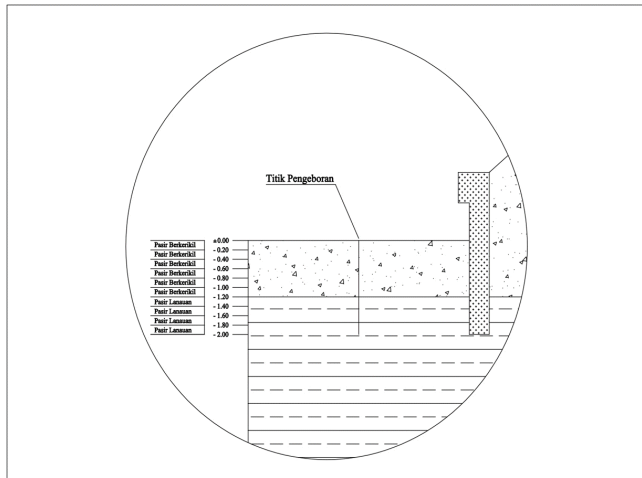
Geologi Hasil Penelitian

Geomorfologi lokasi penyelidikan merupakan morfologi pedataran dengan kemiringan lereng kurang dari $40,3^\circ$ (derajat). Kondisi geologi permukaan daerah penyelidikan berupa endapan aluvium yang terdiri dari tanah lempung ekspansif yang berwarna abu-abu dan belum terjadinya proses litifikasi. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan kondisi tanah permukaan di km 41+00 tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif dapat mengalami perubahan volume akibat perubahan kadar air. Tanah ini memiliki kembang susut yang sangat tinggi akibat adanya perubahan kadar air yang dipengaruhi oleh perubahan musim, dimana hal tersebut menyebabkan tanah menjadi tidak stabil.

Penyelidikan Geoteknik

Penyelidikan geoteknik dilakukan untuk mendapatkan data-data dan gambaran mengenai keadaan jenis dan sifat tanah. Penyelidikan geoteknik (*core drilling*) meliputi pengambilan sample tanah (*core sampling*) dan pengamatan muka air tanah metode pengambilan sample dilakukan dengan menggunakan bor tangan (*hand bor*). Pengambilan sampel tanah dilakukan pada satu titik dengan kedalaman 2 meter,

berikut ini lokasi pengambilan sample tanah. Hasil *hand bore* dan tanah timbunan selanjutnya dilakukan pengujian di laboratorium. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh data teknis yang akurat mengenai kondisi tanah. Data yang diperoleh mencakup sifat fisik seperti kadar air, berat jenis, dan kepadatan tanah.



Gambar 3. Geometri Titik Pengeboran

Hasil Penyelidikan Labolatorium

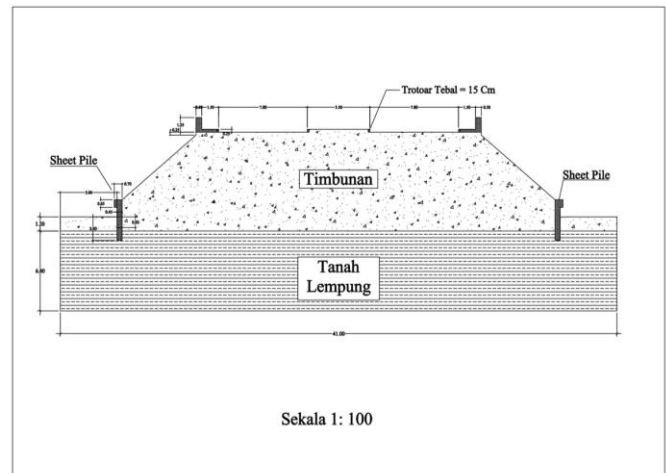
Setelah penyelidikan lapangan selesai, sampel tanah dari hasil *handbore* dan timbunan diuji di Laboratorium Geoteknik CV. Rekeyasa Bumi Karya untuk mengetahui sifat fisik dan mekaniknya. Data teknis yang diperoleh, seperti kadar air, berat jenis, kepadatan, kohesi, dan sudut geser dalam, sangat penting untuk menentukan stabilitas serta daya dukung tanah. Seluruh hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai parameter input dalam simulasi numeris.

Simulasi Numeris

Setelah seluruh data yang dibutuhkan berhasil dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap parameter input yang akan digunakan dalam simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D. Parameter-parameter tersebut diperoleh dari hasil penyelidikan lapangan dan pengujian di laboratorium, yang kemudian dianalisis untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi nyata di lapangan. Kajian ini bertujuan untuk menghasilkan data yang representatif dan dapat diandalkan sebagai dasar dalam pemodelan numerik.

Dalam proses pemodelan numerik, diperlukan komponen utama seperti kondisi tanah dasar, geometri kemiringan lereng, serta parameter input model yang mencerminkan karakteristik tanah di lokasi penelitian. Geometri kemiringan ditentukan berdasarkan hasil pengukuran topografi di lapangan, sedangkan informasi mengenai pelapisan tanah dasar dan

Selain itu, juga dianalisis sifat mekanik tanah seperti kohesi dan sudut geser dalam. Informasi tersebut sangat penting untuk menentukan stabilitas dan daya dukung tanah. Hasil akhir dari pengujian ini akan digunakan sebagai parameter input dalam simulasi numeris.



Gambar 4. Model Cross Section

timbunan diperoleh dari data pengeboran serta hasil uji laboratorium terhadap sampel tanah. Informasi ini menjadi dasar penting dalam membangun model geoteknik yang akurat. Selanjutnya, parameter input model dikembangkan dengan mempertimbangkan deskripsi jenis tanah yang dihasilkan dari uji laboratorium dan pengamatan lapangan. Setiap jenis tanah memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang berbeda, sehingga analisis mendalam terhadap hasil uji diperlukan untuk menentukan nilai-nilai parameter yang tepat. Pemilihan parameter ini sangat krusial, karena akan mempengaruhi validitas hasil simulasi dan ketepatan dalam mengevaluasi perilaku tanah terhadap berbagai beban atau perubahan kondisi. Setelah seluruh data yang dibutuhkan berhasil dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap parameter input yang akan digunakan dalam simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D. Parameter-parameter tersebut diperoleh dari hasil penyelidikan lapangan dan pengujian di laboratorium, yang kemudian dianalisis untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi nyata di lapangan. Kajian ini bertujuan untuk menghasilkan data yang representatif dan dapat diandalkan sebagai dasar dalam pemodelan numerik.

Dalam proses pemodelan numerik, diperlukan komponen utama seperti kondisi tanah dasar, geometri kemiringan lereng, serta parameter input model yang mencerminkan karakteristik tanah di lokasi penelitian. Geometri kemiringan ditentukan berdasarkan hasil pengukuran topografi di lapangan, sedangkan

informasi mengenai pelapisan tanah dasar dan timbunan diperoleh dari data pengeboran serta hasil uji laboratorium terhadap sampel tanah. Informasi ini menjadi dasar penting dalam membangun model geoteknik yang akurat. Selanjutnya, parameter input model dikembangkan dengan mempertimbangkan deskripsi jenis tanah yang dihasilkan dari uji laboratorium dan pengamatan lapangan. Setiap jenis

tanah memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang berbeda, sehingga analisis mendalam terhadap hasil uji diperlukan untuk menentukan nilai-nilai parameter yang tepat. Pemilihan parameter ini sangat krusial, karena akan mempengaruhi validitas hasil simulasi dan ketepatan dalam mengevaluasi perilaku tanah terhadap berbagai beban atau perubahan kondisi.

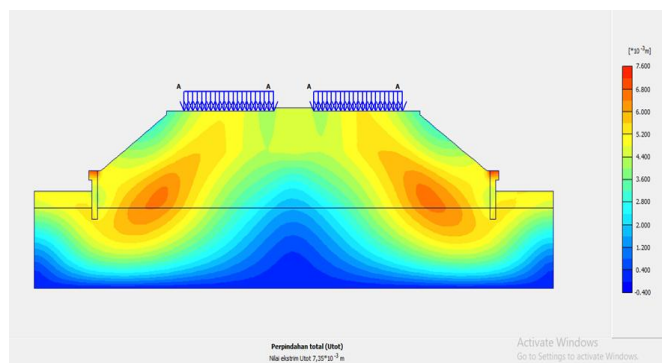
Tabel 1. Nilai Parameter Input Simulasi Numeris

Jenis material	Model material	Tipe	γ unsat (KN/m ³)	γ sat (KN/m ³)	k_x, k_y (m/hr)	ν	E (KN/m ³)	C (KN/m ²)	ϕ ($^{\circ}$)
Pasir Kerikil	Mohr coulomb	Terdrainase	12,300	13,300	30 30	0,25	20000	15,000	14,000
Lanau Pasir	Mohr coulomb	Tak Terdrainase	16,300	17,300	0,01 0,01	0,30	15000	14,000	12,000
Sheet Pile	Elastis Linier	Terdrainase	23,000	24,000	$3,6 \times 10^{-7}$ $3,6 \times 10^{-7}$	0,10	20000	-	-

Deformasi Timbunan Kondisi Eksisting

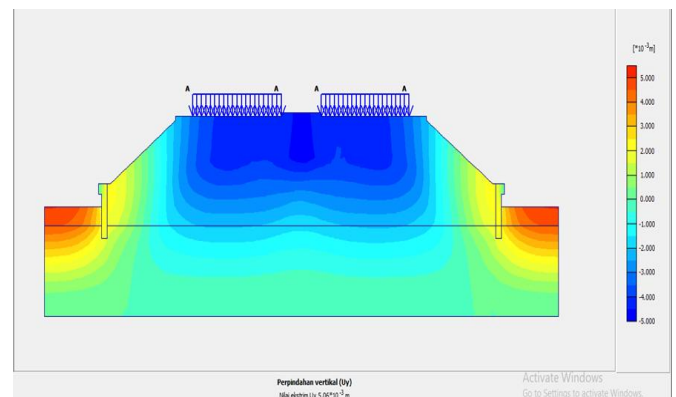
Gambar pertama menunjukkan perpindahan total (U_{tot}) akibat beban kendaraan sebesar 20 ton, dengan nilai maksimum mencapai $7,35 \times 10^{-3}$ m atau setara dengan 7,35 mm. Area dengan warna merah dan jingga yang terfokus di sisi bawah dinding penahan serta pada tubuh lereng menunjukkan zona dengan akumulasi deformasi tertinggi. Zona-zona ini menandai area kritis yang paling rentan terhadap pergeseran tanah, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi.

Deformasi yang terjadi merupakan hasil kombinasi dari gaya vertikal yang ditimbulkan oleh beban kendaraan dan tekanan lateral dari massa tanah di sekitarnya. Apabila tidak diperhitungkan secara akurat dalam perencanaan struktur penahan tanah, gaya-gaya ini dapat menyebabkan kegagalan sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi menyeluruh terhadap distribusi deformasi ini guna menjamin kestabilan dan keamanan struktur dalam jangka panjang.



Gambar 5. Total Displacement ($7,35 \times 10^{-3}m$)

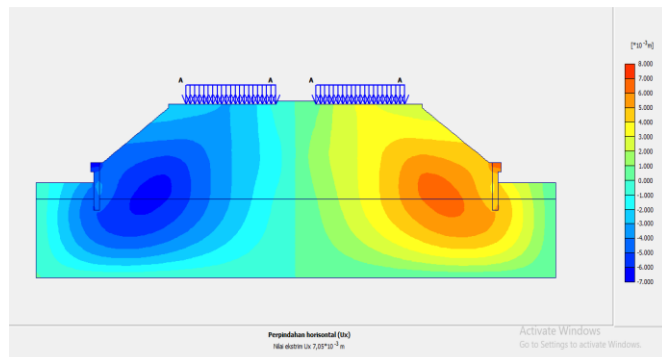
Gambar kedua menampilkan perpindahan vertikal (U_y) dengan nilai maksimum $5,06 \times 10^{-3}$ m atau sekitar 5,06 mm. Dominasi warna biru tua di tengah struktur menunjukkan adanya penurunan (settlement) di bawah beban kendaraan 20 ton yang berada di permukaan jalan. Ini menandakan bahwa tekanan vertikal dari beban terfokus menyebabkan konsolidasi tanah di bawah permukaan jalan, terutama jika tanah dasar bersifat lunak atau jenuh air. Menurut teori konsolidasi Terzaghi, penurunan ini akan terjadi secara bertahap dan bisa meningkat jika beban lalu lintas terus berulang tanpa perkuatan tambahan.



Gambar 6. Vertikal Displacement ($5,06 \times 10^{-3}m$)

Gambar ketiga ditampilkan perpindahan horizontal (U_x) dengan beban kendaraan 20 ton nilai maksimum $7,05 \times 10^{-3}$ m atau 7,05 mm. Terlihat bahwa perpindahan dominan ke arah lateral terjadi pada kedua sisi dinding underpass, terutama pada daerah yang berdekatan dengan lereng. Ini mengindikasikan bahwa tekanan tanah lateral mendorong dinding ke luar akibat

beban vertikal dari kendaraan yang menimbulkan gaya geser horizontal, sejalan dengan teori tekanan tanah aktif (Rankine/Coulomb), yang menyatakan bahwa tekanan lateral meningkat dengan kedalaman dan beban tambahan.



Gambar 7. Horizontal Displacement ($7,35 \times 10^{-3}m$)

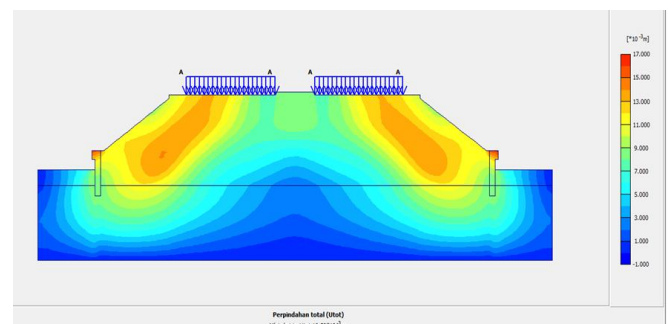
Pada gambar pertama, perpindahan total (U_{tot}) dengan beban kendaraan 20 ton menunjukkan nilai maksimum sebesar $7,35 \times 10^{-3}$ m atau 7,35 mm. Warna merah dan jingga yang terfokus di sisi bawah dinding penahan serta pada lereng menunjukkan akumulasi deformasi terbesar, yang menandakan area kritis terhadap deformasi. Deformasi ini merupakan hasil kombinasi gaya vertikal akibat beban kendaraan dan tekanan lateral dari massa tanah, yang dapat menyebabkan pergerakan struktur secara menyeluruh jika tidak diperhitungkan secara tepat dalam desain. Gambar kedua menampilkan perpindahan vertikal (U_y) dengan nilai maksimum $5,06 \times 10^{-3}$ m atau sekitar 5,06 mm. Dominasi warna biru tua di tengah struktur menunjukkan adanya penurunan (settlement) di bawah beban kendaraan 20 ton yang berada di permukaan jalan. Ini menandakan bahwa tekanan vertikal dari beban terfokus menyebabkan konsolidasi tanah di bawah permukaan jalan, terutama jika tanah dasar bersifat lunak atau jenuh air.

Menurut teori konsolidasi Terzaghi, penurunan ini akan terjadi secara bertahap dan bisa meningkat jika beban lalu lintas terus berulang tanpa perkuatan tambahan. Pada gambar ketiga ditampilkan perpindahan horizontal (U_x) dengan beban kendaraan 20 ton nilai maksimum $7,05 \times 10^{-3}$ m atau 7,05 mm. Terlihat bahwa perpindahan dominan ke arah lateral terjadi pada kedua sisi dinding underpass, terutama pada daerah yang berdekatan dengan lereng. Ini mengindikasikan bahwa tekanan tanah lateral mendorong dinding ke luar akibat beban vertikal dari kendaraan yang menimbulkan gaya geser horizontal, sejalan dengan teori tekanan tanah aktif (Rankine/Coulomb), yang menyatakan bahwa tekanan lateral meningkat dengan kedalaman dan beban tambahan.

Deformasi Timbunan Underpass Setelah Mengalami Konsolidasi

Konsolidasi adalah proses pemadatan tanah jenuh yang berlangsung secara bertahap akibat keluarnya air dari pori-pori tanah sebagai respon terhadap beban eksternal. Proses ini disebut konsolidasi primer dan dijelaskan secara mendalam oleh Terzaghi (1943), yang menekankan bahwa laju dan besarnya konsolidasi dipengaruhi oleh koefisien konsolidasi, permeabilitas tanah, serta ketebalan lapisan tanah. Dalam konteks pembangunan underpass selama empat tahun terakhir, beban dari struktur dan aktivitas lalu lintas di atasnya meningkatkan tekanan air pori pada lapisan tanah jenuh di bawah permukaan. Ketidakseimbangan tegangan horizontal akibat proses konsolidasi dan perubahan volume tanah dapat memicu pergerakan lateral. Craig (2004) menyatakan bahwa pada tanah lempung jenuh, tekanan air pori yang tinggi berisiko menimbulkan aliran lateral dan deformasi plastis, terutama jika sistem drainase tidak berfungsi secara efektif.

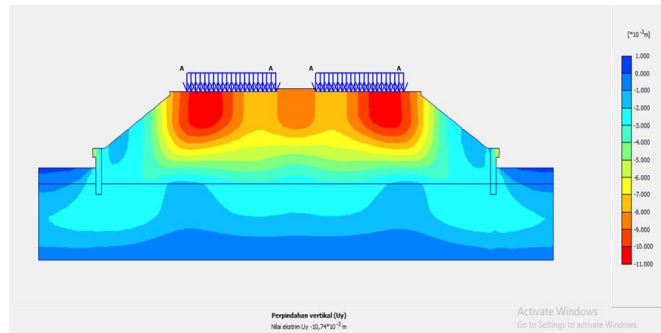
Konsolidasi merupakan proses pemadatan tanah jenuh yang terjadi secara bertahap akibat pengeluaran air dari pori-pori tanah sebagai respon terhadap beban dari luar. Proses ini dikenal sebagai konsolidasi primer dan dijelaskan secara mendalam oleh Terzaghi (1943), yang menekankan bahwa laju dan besarnya konsolidasi sangat bergantung pada karakteristik tanah, seperti koefisien konsolidasi, permeabilitas, serta ketebalan lapisan tanah yang menahan beban. Dalam tanah lempung jenuh, konsolidasi tidak hanya menyebabkan perubahan volume secara vertikal, tetapi juga dapat memicu deformasi lateral apabila sistem drainase tidak memadai.



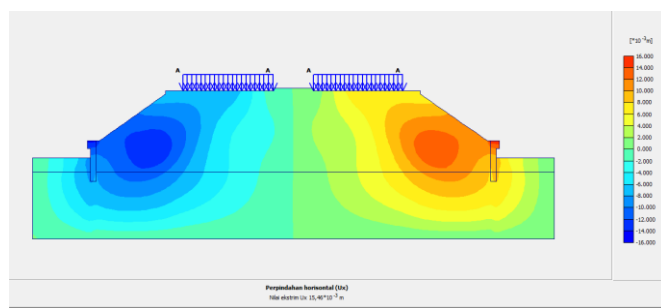
Gambar 8. Total Displacement ($16,59 \times 10^{-3}m$)

Dalam praktiknya, fenomena konsolidasi ini terlihat pada proyek pembangunan underpass selama empat tahun terakhir. Beban dari struktur dan aktivitas lalu lintas berat, seperti kendaraan 20 ton yang melintas berulang kali, meningkatkan tekanan air pori di lapisan tanah jenuh bawah permukaan. Ketidakseimbangan distribusi tegangan horizontal yang terjadi sebagai akibat proses konsolidasi dan pengurangan volume

tanah, berpotensi menimbulkan pergerakan tanah baik secara vertikal maupun horizontal. Craig (2004) menyatakan bahwa pada tanah lempung jenuh, tekanan air pori yang tinggi dapat mengakibatkan aliran lateral dan deformasi plastis, terutama bila drainase tanah tidak optimal.



Gambar 9. Vertikal Displacement ($10,74 \times 10^{-3}m$)

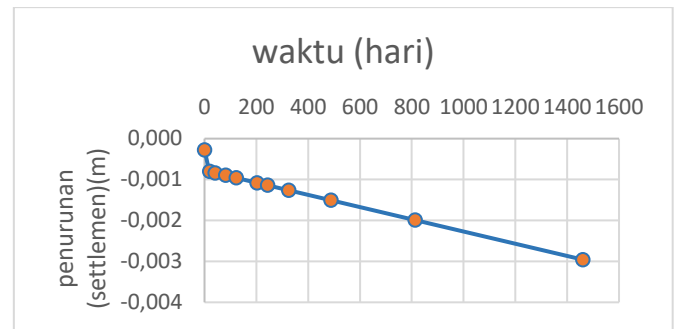


Gambar 10. Horizontal Displacement ($7,05 \times 10^{-3}m$)

Gambar pertama memperlihatkan perpindahan total (U_{tot}) dengan nilai maksimum 16,59 mm yang terjadi di bawah timbunan tengah. Perpindahan ini merupakan hasil gabungan antara deformasi vertikal dan horizontal, yang menunjukkan terjadinya konsolidasi sekunder akibat beban berulang dari kendaraan berat. Teori konsolidasi Terzaghi menjelaskan bahwa setelah beban diterapkan, air dari pori-pori tanah keluar secara perlahan, sehingga terjadi penyusutan volume tanah dan penurunan permukaan. Gambar kedua memperlihatkan perpindahan vertikal (U_y) dengan nilai penurunan maksimum sebesar 10,74 mm yang terjadi tepat di bawah jalur roda. Pola penurunan yang simetris ini mengindikasikan terjadinya settlement yang relatif seragam pada lapisan tanah lunak di bawah timbunan.

Fenomena settlement ini perlu menjadi perhatian serius karena dapat menimbulkan kerusakan struktural pada infrastruktur seperti underpass, jika tidak dikendalikan. Sementara itu, gambar ketiga menunjukkan perpindahan horizontal (U_x), di mana pergeseran lateral maksimum mencapai 15,46 mm pada sisi kiri dan kanan timbunan. Pergeseran ini mencerminkan gaya lateral yang timbul akibat tekanan timbunan dan kendaraan, yang mendorong tanah ke

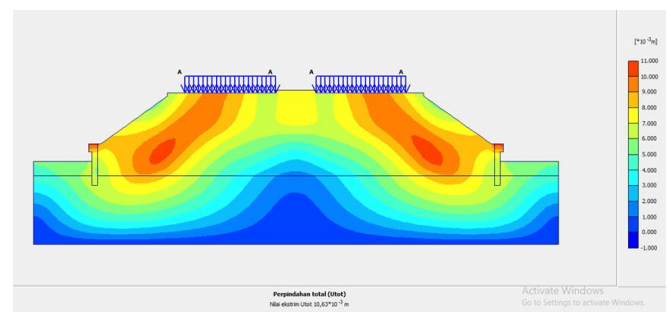
arah samping. Dalam konteks mekanika tanah, hal ini dikaitkan dengan konsep plasticity soil mechanics, di mana tanah lunak mengalami aliran plastis lateral ketika tekanan efektif meningkat seiring berlangsungnya proses konsolidasi jangka panjang.



Gambar 9. Grafik Penurunan Settlement

Stabilitas Kondisi Eksisting

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak Plaxis pada struktur underpass di Jl. Bypass KM 41+00 Bill Mandalika menunjukkan bahwa perpindahan total (U_{tot}) terjadi akibat pembebanan dari kendaraan bermuatan 20 ton di atas timbunan. Perpindahan ini menunjukkan bahwa struktur tanah mengalami deformasi sebagai respons terhadap gaya vertikal yang ditransmisikan melalui timbunan menuju lapisan tanah dasar. Nilai faktor keamanan lereng (safety factor/SF) yang diperoleh dari simulasi adalah 1,39. Meskipun angka ini secara teknis masih dianggap aman, nilainya mendekati batas minimum kestabilan, terutama pada tanah dengan karakteristik lunak dan jenuh air.



Gambar 11. Model Bidang Kondisi Eksisting

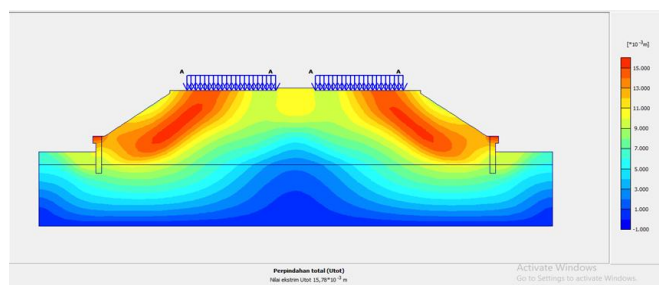
Beban kendaraan yang bersifat statis menyebabkan gaya tekan vertikal yang signifikan, diteruskan ke dalam lapisan tanah lempung jenuh di bawahnya. Lapisan ini, karena memiliki permeabilitas rendah, tidak dapat segera melepaskan tekanan air pori yang meningkat akibat pembebanan tersebut. Akibatnya, tekanan air pori tetap tinggi dalam jangka waktu tertentu dan menimbulkan deformasi, baik dalam arah vertikal (penurunan atau settlement) maupun horizontal (pergerakan lateral). Hal ini sejalan dengan teori konsolidasi Terzaghi yang menjelaskan

bahwa peningkatan tekanan efektif dan lambatnya disipasi air pori dapat menyebabkan perubahan volume tanah secara bertahap.

Stabilitas Setelah mengalami konsolidasi

Gambar di atas menunjukkan hasil analisis deformasi total (U_{tot}) akibat proses konsolidasi selama empat tahun, yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak Plaxis 8.6. Pemodelan ini dilakukan setelah konstruksi timbunan pada struktur underpass dengan tambahan beban kendaraan seberat 20 ton. Analisis ini mengilustrasikan akumulasi deformasi tanah akibat beban jangka panjang, baik secara vertikal maupun horizontal, yang terjadi pada lapisan tanah lempung jenuh di bawah timbunan.

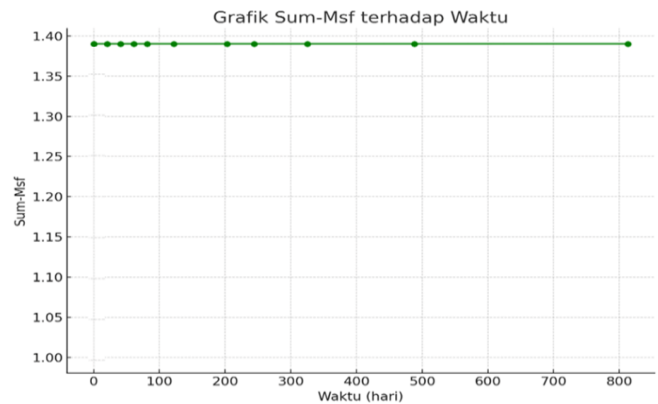
Berdasarkan hasil simulasi, nilai angka keamanan lereng (*Factor of Safety/FOS*) tercatat sebesar 1,59. Nilai ini menunjukkan bahwa kondisi lereng secara umum masih tergolong stabil, mengingat standar umum menetapkan bahwa $FOS > 1,2$ dianggap aman untuk kondisi jangka panjang. *FOS* sebesar 1,59 mengindikasikan bahwa gaya penahan tanah masih cukup untuk menahan gaya geser yang muncul akibat berat timbunan serta beban kendaraan yang berulang. Namun demikian, meskipun lereng dikategorikan aman, nilai *FOS* yang mendekati batas bawah untuk desain infrastruktur transportasi jangka panjang menandakan perlunya kajian lanjutan dan pemantauan berkala. Faktor-faktor eksternal seperti curah hujan yang tinggi dan getaran akibat lalu lintas kendaraan berat dapat mempercepat proses degradasi dan pelemahan struktur tanah.



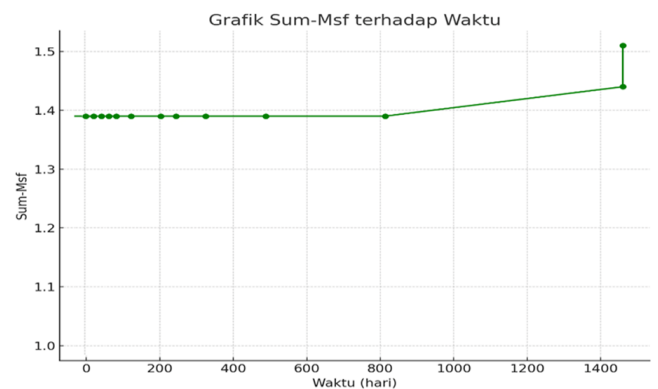
Gambar 12. Model Bidang Longsor Setelah Mengalami Konsolidasi

Kondisi ini berpotensi meningkatkan risiko deformasi dan ketidakstabilan lereng, terutama pada daerah yang memiliki karakteristik tanah lempung atau tanah dengan daya dukung rendah. Oleh karena itu, langkah-langkah mitigasi perlu dipertimbangkan secara serius untuk menjaga stabilitas jangka panjang. Beberapa upaya yang dapat dilakukan antara lain pemasangan sistem drainase yang efektif untuk mengurangi tekanan air pori, pemadatan ulang tanah guna meningkatkan kepadatan dan kekuatan tanah,

serta penggunaan geotekstil sebagai perkuatan tambahan untuk memperkuat struktur lereng dan mencegah erosi.



Gambar 12. Kondisi Eksisting



Gambar 13. Grafik Setelah Mengalami Konsolidasi

Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan adanya perubahan signifikan pada perilaku tanah akibat penambahan beban kendaraan dan proses konsolidasi, yang tercermin dari evaluasi deformasi dan stabilitas lereng. Deformasi pada kondisi eksisting tercatat sebesar 5,06 mm secara vertikal dan 7,05 mm secara horizontal. Setelah proses konsolidasi, terjadi peningkatan deformasi menjadi 10,74 mm secara vertikal dan 15,46 mm secara horizontal.

Dari sisi stabilitas, lereng dalam kondisi eksisting memiliki angka keamanan sebesar 1,39, yang masih berada di atas batas aman (1,2). Menariknya, setelah konsolidasi, angka keamanan meningkat menjadi 1,59, yang menandakan bahwa lereng menjadi lebih stabil. Oleh karena itu, disarankan untuk dilakukan pemantauan berkala terhadap deformasi dan angka keamanan lereng, terutama setelah adanya penambahan beban. Jika diperlukan, perkuatan lereng seperti sistem drainase atau perkuatan tanah dapat dipertimbangkan guna menjaga kestabilan lereng dalam jangka panjang, meskipun kondisi saat ini masih dinyatakan aman.

Ucapan Terimakasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Referensi

- Anonim. (2018). Perencanaan pembangunan dinding penahan bore pile Vila Sekeq. Dalam Laporan Penyelidikan Geoteknik. Mataram: CV Rekayasa Bumi Karya (CV. RBK).
- Bowles, J. E. (1986). Sifat-sifat fisis dan geoteknis tanah (Ed. 2). Terjemahan dari *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Brinkgreve, R. B. J., & Vermeer, P. A. (2007). *Plaxis version 7*. A.A. Balkema.
- Craig, R. F. (1987). *Mekanika tanah*. Erlangga.
- Das, B. M. (1988). *Mekanika tanah: Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis* (Jilid 1). Erlangga.
- Das, B. M. (1993). *Mekanika tanah: Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis* (Jilid 2). Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387–403.
- Hardiyatmo, H. C. (2003). *Mekanika tanah II*. Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2006a). *Mekanika tanah I*. Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2006b). *Penanganan tanah longsor* (Edisi 1). Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan perancangan fondasi bagian I*. Gadjah Mada University Press.
- Liu, C., & Evett, B. J. (1981). *Soil and foundations*. Prentice Hall.
- Mochtar, N. E., & Mochtar, L. B. (tanpa tahun). [Judul tidak disebutkan]. Erlangga.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation engineering*. John Wiley and Sons, Inc.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. John Wiley and Sons.
- Sinaga, A. A. (2022). *Analisis tanah sebagai material timbunan bendungan Randugunting Kabupaten Blora* (Skripsi, Universitas Semarang, Fakultas Teknik).
- Srihindayani, S., & Mazni, D. I. (2021). *Karakteristik tanah timbunan sebagai pengganti subgrade di lahan gambut* (Skripsi, Universitas Dharma Andalas, Padang).
- Suhendro, B. (2000). *Metode elemen hingga dan aplikasinya*. Beta Offset.
- Sukmawati, D. (2018). *Analisis perkuatan tanah lunak terhadap perkuatan geogrid menggunakan metode elemen hingga* (Skripsi, Universitas Muhammadiyah Palu, Fakultas Teknik).
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley and Sons, Inc.
- Weaver, W. (1993). *Finite element for structural analysis*. Prentice Hall.
- Wesley, L. D. (1977). *Mekanika tanah* (Edisi VII). Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Wruwu, N. N. S. (2021). *Analisis stabilitas timbunan terhadap Jalan Tol Medan-Kualanamu-Tebing Tinggi Seksi 7A: Sei Rampah–Sei Bamba (STA 81+000) beserta metode pematatannya* (Skripsi, Universitas [Nama belum lengkap], Medan).