



Pemodelan Numerikal Kestabilan Lereng Galian *Abutment* Jembatan pada Ruas Jalan Tol Bogor – Ciawi – Sukabumi

Prana Kurnia^{1*}, Indra Noer Hamdhan¹, Adrin Tohari²

¹Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Insitut Teknologi Nasional, Bandung

²Pusat Penelitian Geoteknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung

^{*)}prana.kurnia.s@gmail.com

Received: 3 Januari 2023 Revised: 28 Desember 2023 Accepted: 3 Januari 2024

Abstract

The Cikereteg Bridge is one of the infrastructures on the Bogor-Ciawi-Sukabumi Toll Road. Based on drilling data, it is recognized that the groundwater level is high and that the slope under the bridge has soil with a low standard penetration tests value (N-SPT) of less than 10. Hence, the stability of the slope is called into doubt. In order to strengthen slope stability under the bridge, this research will investigate slope stability while taking seismic loads into account and offer options for efficient slope reinforcement. By using the PLAXIS 2D software, the finite element method was used to analyze slope stability. The outcomes of the modelling suggest that the slope may not be stable, since it does not fulfill the design slope criteria, which are 1.8 for static conditions and 1.5 for earthquake situations. Respectively, the safety factor value is 1.396 for static condition and 1.068 when given an earthquake load. The design reinforcement model's results highlight that the subdrain reinforcement in combination with bored piles and ground anchors can fulfill the criteria for the slope of the bridge plan.

Keywords: *Slope Stability, Subdrain, Ground Anchor, Bored pile, Earthquake*

Abstrak

Jembatan Cikereteg merupakan salah satu infrastruktur pada proyek pembangunan Jalan Tol Ruas Bogor-Ciawi-Sukabumi. Berdasarkan data pengeboran, diketahui lereng di bawah jembatan memiliki tanah dengan nilai N-SPT kurang dari 10 dengan muka air tanah yang tinggi. Sehingga, menimbulkan pertanyaan mengenai kestabilan lereng tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan mempertimbangkan beban gempa serta memberikan rekomendasi perkuatan lereng yang efektif untuk meningkatkan stabilitas lereng di bawah jembatan tersebut. Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan program PLAXIS 2D. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa lereng tidak stabil, karena tidak memenuhi kriteria lereng rencana, yaitu 1,8 untuk kondisi statis dan 1,5 untuk situasi gempa. Nilai faktor keamanan masing-masing adalah 1,396 untuk kondisi statis dan 1,068 saat diberikan beban gempa. Hasil dari pemodelan perkuatan rencana menunjukan bahwa, penggunaan subdrain yang dikombinasikan dengan bored pile maupun ground anchor dapat memenuhi kriteria lereng rencana jembatan tersebut.

Kata kunci: *Stabilitas lereng, Subdrain, Ground anchor, Bored pile, Gempa*

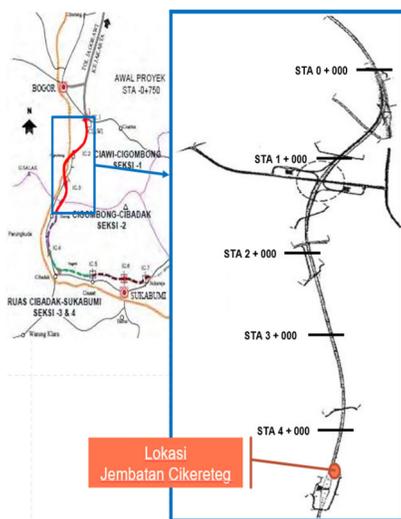
Pendahuluan

Pada daerah perbukitan dan lembah, kestabilan lereng merupakan aspek geoteknik yang penting dalam konstruksi infrastruktur jalan raya dan tol seperti jembatan dan badan jalan. Dalam pelaksanaan konstruksi infrastruktur jalan tol, kegiatan pemotongan lereng kadang-kadang perlu dilakukan. Pemotongan lereng sering menimbulkan

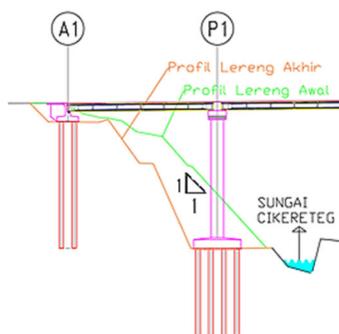
permasalahan pada kestabilan lereng galian atau kupasan tersebut yang ditandai dengan penurunan nilai faktor keamanan lereng sehingga perlu dilakukan perkuatan untuk mencegah kelongsoran lereng. Menurut Akhirianto dan Naryanto (2016), tanah longsor atau gerakan tanah adalah suatu konsekuensi fenomena dinamis alam untuk mencapai kondisi baru akibat adanya gangguan keseimbangan atau kestabilan lereng yang terjadi,

baik secara alamiah maupun akibat ulah manusia. Tanah longsor akan terjadi pada suatu lereng pada keadaan ketidakseimbangan tanah yang dapat menyebabkan terjadinya suatu proses mekanis dimana sebagian tanah bergerak mengikuti gaya gravitasi. Setelah tanah longsor terjadi, lereng akan seimbang atau stabil kembali. Terganggunya kestabilan lereng tanah atau batuan terjadi karena adanya faktor pengontrol dan proses pemicu.

Faktor pengontrol adalah faktor-faktor yang memengaruhi kondisi material tanah/batuan seperti kondisi geologi, kemiringan lereng, litologi, sesar dan kekar pada batuan. Faktor pemicu gerakan adalah penyebab langsung, yaitu proses yang merubah kondisi lereng dari rentan menjadi kondisi benar - benar bergerak setelah melampaui kondisi kritis, seperti curah hujan, gempa bumi, erosi kaki lereng dan aktivitas manusia. Hal ini yang menjadi konsen pada pembangunan Jembatan Cikereteg pada proyek pembangunan Jalan Tol Ruas Bogor-Ciawi-Sukabumi (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi penelitian



Gambar 2. Sketsa profil lereng abutment (A1) dan pilar (P1) Jembatan Cikereteg.

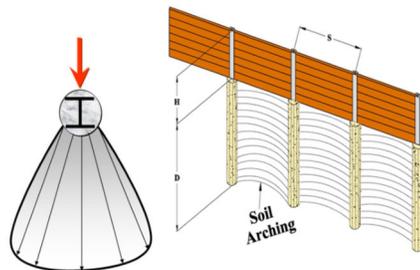
Pada salah satu bagian abutment (A1) dan pilar (P1) jembatan ini terletak pada lereng Sungai Cikereteg yang cukup curam, dengan perbandingan kemiringan leeng 1:1. Dalam pelaksanaan pondasi tiang bor untuk *abutment* dan pilar jembatan tersebut, dilakukan pemotongan lereng terutama di bagian kaki lereng sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan data pengeboran, dijumpai lapisan tanah lunak dengan nilai SPT < 10) setebal 12 m dan muka air tanah yang tinggi, sehingga timbul kecurigaan akan kondisi kestabilan lereng tersebut. Di lokasi tersebut diketahui telah dipasang drainase horizontal (*subdrain*) sebagai upaya untuk menjaga kestabilan lereng.

Drainase horizontal adalah salah satu pilihan yang paling efektif untuk menstabilkan tanah dengan sistem pengurangan kandungan jumlah air dalam tanah ini (Santi dan Elifrits, 2001). Selain itu keuntungan dari penggunaan drainase horizontal adalah kemudahan dalam pemasangan (rata - rata 15m/jam oleh tenaga tidak terampil) dan murah (\pm \$ 12/m). Pengendalian air permukaan merupakan langkah awal dari setiap rencana penanggulangan longoran (Lestari, 2017). Pengendalian air permukaan ini adalah untuk mengurangi berat massa tanah yang bergerak dan menambah kekuatan material pembentuk lereng. Dua hal yang harus diperhatikan adalah air permukaan yang akan mengalir pada permukaan lereng dan yang akan meresap ke dalam tanah. Air permukaan harus dicegah agar tidak mengalir menuju area longoran, sedangkan mata air, rembesan, dan genangan di area longoran harus dialirkan ke luar.

Mengingat lokasi jembatan berada di wilayah Bogor, Jawa Barat yang berpotensi akan bencana geologi akibat banyaknya gunung api dan patahan atau sesar aktif (Zakaria *et al.*, 2011), maka potensi ancaman gempa bumi perlu dipertimbangkan. Pengaruh gempa dalam mengurangi tingkat keamanan lereng masih cukup besar meskipun sebuah lereng telah diperkuat yang menyebabkan peluang untuk terjadinya tanah longsor juga akan semakin tinggi akibat adanya gempa (Dharmayasa dan Utami, 2017). Menurut Widisaputra *et al* (2020), gempa berpengaruh signifikan pada penurunan stabilitas lereng, dimana nilai faktor keamanan dapat turun sebesar 1/3 - 1/2 dari nilai faktor keamanan pada kondisi statis. Sehingga analisis gempa ini menjadi penting. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang tepat dalam memilih perkuatan untuk penanganan sebuah lereng. Pada penelitian ini, perkuatan tambahan yang akan dicoba untuk dimodelkan jikalau memang diperlukan adalah perkuatan tiang bor (*bored pile*) dan ankur tanah (*ground anchor*). Tiang bor adalah pondasi dalam yang dicor di tempat, yang dibangun dalam sebuah lubang yang telah

distabilisasi supaya peletakan tulangan baja dan cor beton dapat terkontrol. Diameternya yang besar memberikan tahanan yang baik terhadap geser dan guling (California Department of Transportation, 2011). *Soldier pile* merupakan tiang bor yang akan difungsikan sebagai dinding penahan tanah dan diaplikasikan untuk menerima dan menahan gaya atau beban horizontal yang ditimbulkan dari tekanan tanah maupun air yang ditahannya serta bangunan yang ada di sebelahnya. Kedalaman dan diameter tiangnya bergantung dari perhitungan kekuatan berdasarkan ketinggian, jenis tanah dan perkiraan beban horizontal yang ada pada lereng (Mina *et al.*, 2014)

Pada suatu barisan *bored pile* yang ditanamkan ke dalam tanah sampai pada kedalaman tanah keras (*soldier pile*), dapat membentuk *soil arching effect* (seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3) yaitu perpindahan tegangan dari tanah di depan (*upslope*) barisan *bored pile* menuju tanah di belakang (*downslope*) *bored pile*, karena massa tanah berusaha bergerak melalui sela-sela antar tiang bor yang kaku (Liang dan Zeng, 2002). Dinding penahan tanah *soldier pile* ini sebagai struktur penahan tanah dapat digunakan di hampir semua jenis tanah dan segala jenis lapangan.



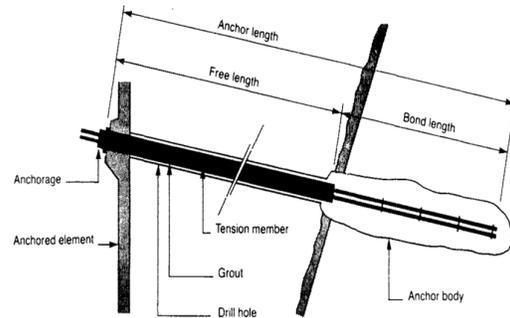
Passive Resistance Zone
Sumber: (California Departement of Transportaion, 2011)

Gambar 3. Soil arching effect

Angkur tanah (*ground anchor*) adalah elemen struktural yang dipasang pada tanah atau batu yang digunakan untuk mentransmisikan beban tarik yang diterapkan ke dalam tanah. Komponen pada ankur tanah (*ground anchor*) meliputi *head anchor*, *free length anchor*, dan *bond length anchor* seperti pada Gambar 4. *Bond length anchor* adalah bagian dari tendon yang terjauh dikelilingi oleh *grouting* (material semen) dimana gaya tarik dipindahkan ke tanah disekitar jangkar.

Free length anchor adalah tendon bagian atas dimana tidak ada gaya tarik yang dipindahkan ke tanah disekitar jangkar, dan dapat bebas bergerak selama interaksi tanah dan jangkar terjadi, sehingga dapat terjadi *elongation*. *Head anchor* merupakan komponen jangkar yang dapat memindahkan beban tarik dari jangkar ke permukaan tanah atau struktur.

Sehingga, *ground anchor* dapat berfungsi untuk menahan beban lateral dari timbunan tanah di belakang dinding penahan tanah. (Xanthakos, 1991).



Sumber: Xanthakos, 1991

Gambar 4. Komponen Ground Anchor

Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menentukan faktor keamanan dari bidang longsor yang potensial pada lereng, yaitu dengan menghitung besarnya kekuatan geser untuk mempertahankan kestabilan lereng dan menghitung kekuatan geser yang menyebabkan kelongsoran yang kemudian keduanya dibandingkan.

Dari perbandingan yang ada didapat nilai faktor keamanan yang merupakan nilai kestabilan lereng yang dinyatakan dalam angka (Pangemanan *et al.*, 2014). Terdapat banyak sekali metode yang dapat digunakan dalam menganalisis stabilitas lereng. Salah satunya dan yang paling populer adalah metode elemen hingga (*finite element method*). Metode ini merupakan pendekatan alternatif yang sangat baik untuk analisis stabilitas lereng yang akurat, serbaguna dan membutuhkan lebih sedikit asumsi apriori, terutama mengenai mekanisme *failure* dibandingkan dengan metode kesetimbangan batas (Griffiths & Lane., 1999).

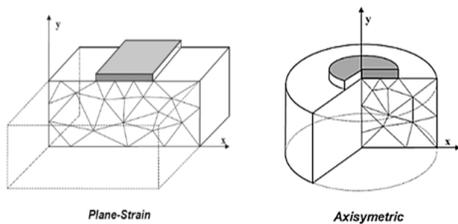
Penelitian ini adalah melakukan pemodelan kestabilan lereng pada abutment Jembatan Cikereteg dengan mempertimbangkan beban gempa. Analisis akan dilakukan dengan bantuan software PLAXIS 2D versi 22 yang berbasis metode elemen hingga dengan tujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan sebagai petunjuk mengenai kestabilan lereng dan memodelkan rekomendasi perkuatan tanah untuk menangani permasalahan lereng tersebut.

Metode

Langkah utama yang harus dilakukan dalam penggunaan perangkat PLAXIS 2D versi 22 adalah penentuan model geometri, penentuan model konstitutif material, dan penentuan parameter model sebelum melakukan perhitungan.

Model geometri

Terdapat 2 kondisi pemodelan, yaitu kondisi *plane-strain* dan *axisymmetric* seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Kondisi *plane-strain* digunakan dalam menganalisis model yang memiliki potongan melintang dan kondisi tegangan yang seragam. Kondisi *axisymmetric* digunakan dalam menganalisis struktur atau pemodelan lingkaran yang memiliki potongan radial dan pembebanan seragam terhadap pusat dengan deformasi dan tegangan yang dianggap bernilai sama pada arah radialnya. (Hamdhan dan Iskandar, 2019). Kondisi pemodelan yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis model plain-strain.



Sumber: Hamdhan dan Iskandar, 2019

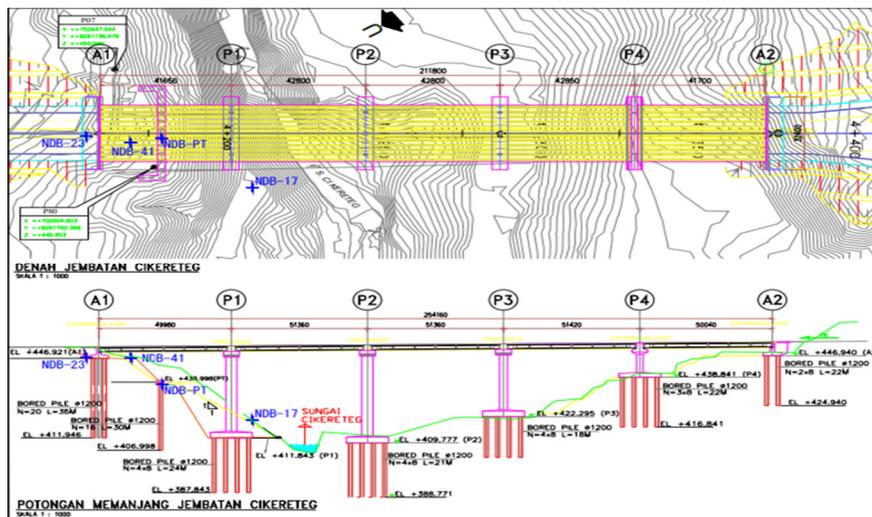
Gambar 5. Contoh pemodelan *plane-strain* dan *axisymmetric*

Pemodelan lereng dibuat berdasarkan peta topografi dan gambar teknis rencana Jembatan Cikereteg seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6. Kemudian gambar tersebut disesuaikan dengan data penyelidikan tanah berupa data lokasi pengeboran serta data borlog yang telah dirangkum seperti diagram yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Data lokasi pengeboran diplotkan pada peta dan gambar teknis rencana yang disesuaikan dengan hasil pengolahan data borlog sebelumnya sehingga diperoleh penampang lereng awal sebelum adanya

jembatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Pemodelan dilanjutkan dengan model lereng setelah adanya jembatan. Bagian jembatan yang dimodelkan adalah abutment, pilar, dan fondasi jembatan yang dimana material yang digunakan adalah beton dengan mutu beton K-350 atau $f'c$ 29Mpa. Beban lalu lintas sebesar 15 kPa yang mengacu pada SNI 8460:2017 dan bagian pelat jembatan dimodelkan menjadi beban merata yang nantinya dibebankan pada abutment dan pilar jembatan dengan perhitungan statika sederhana.

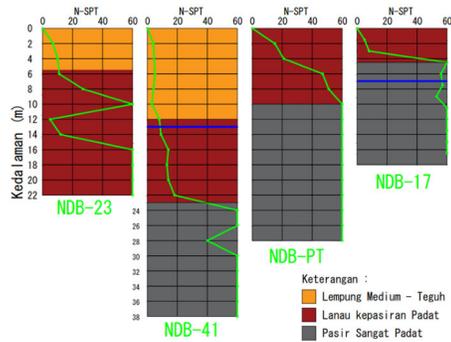
Model lereng setelah ada jembatan yang telah disesuaikan dengan gambar teknik dimana terdapat pemotongan di kaki lereng selanjutnya disebut sebagai model lereng eksisting ditunjukkan oleh Gambar 9. Pemodelan lereng dilanjutkan dengan pemodelan lereng eksisting dengan penggunaan *subdrain* yang merupakan metode peningkatan stabilitas lereng yang telah digunakan di lapangan. Penentuan lokasi disesuaikan dan ditentukan berdasarkan bidang kelongsoran dari pemodelan lereng eksisting dikarenakan tidak diperolehnya data mengenai lokasi pemasangan *subdrain* tersebut. Pemodelan perkuatan tambahan akan dilakukan apabila nilai faktor keamanan lereng tidak memenuhi kriteria rencana lereng yang telah ditentukan.

Nilai faktor keamanan atau *safety factor* (FK) rencana mengacu pada Manual Penanganan Lereng (2005) yang ditunjukkan pada pertimbangan tingkat ketidakpastian kondisi analisis yang berkaitan dengan ketelitian dan kualitas data yang diperoleh serta resiko dari konsekuensi kegagalan lereng tersebut. Jembatan Cikereteg termasuk kedalam kategori risiko tinggi karena merupakan jembatan bentang panjang untuk jalan tol sehingga merupakan konstruksi yang mahal dan penting.

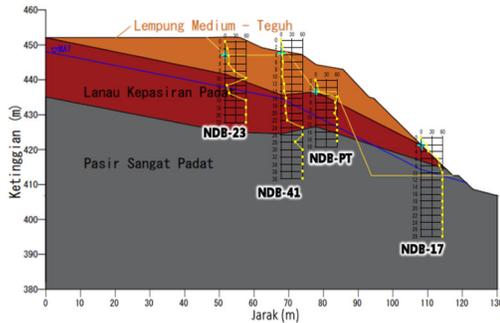


Gambar 6. Gambar rencana teknis Jembatan Cikereteg

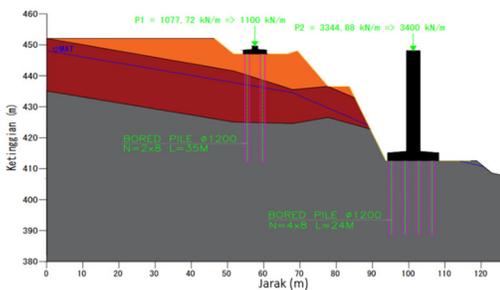
Ketelitian data termasuk dalam kategori kurang teliti karena data yang diperoleh dan diolah hanya merupakan data dari pengeboran teknik. Sehingga nilai faktor keamanan lereng rencana yang digunakan untuk kondisi statis adalah 1,8 dan untuk kondisi gempa adalah 1,5.



Gambar 7. Diagram data borlog



Gambar 8. Penampang lereng awal



Gambar 9. Penampang Lereng Eksisting

Model konstitutif material

Model konstitutif adalah model yang menggambarkan perilaku hubungan tegangan-regangan suatu material akibat pembebanan. Menurut Prasetyo dan Hambali (2014) model *Mohr-Coulomb* sangat cocok untuk digunakan dalam menganalisa stabilitas lereng. Model *Mohr-Coulomb* adalah model elastis-plastis yang disarankan untuk digunakan dalam analisis awal dari masalah yang dihadapi karena relatif sederhana, cepat dan saat tidak diperoleh data tanah

yang memadai, sehingga model konstitutif yang digunakan adalah *Mohr-Coulomb*.

Kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb* ditunjukkan oleh garis lurus (*Mohr-Coulomb failure envelope*), yang menunjukkan batas kondisi stabil dari keruntuhan dimana regangan yang berada di bawah garis adalah keadaan stabil. Keruntuhan terjadi ketika tegangan menyentuh atau melewati garis keruntuhan *Mohr-Coulomb*. (Sompie, 2018). Kriteria keruntuhan dirumuskan pada Persamaan 1.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

Dimana τ adalah kuat geser tanah, σ adalah tegangan normal, c adalah kohesi tanah, dan ϕ adalah sudut geser tanah.

Dalam analisis stabilitas lereng dengan metode elemen hingga, faktor keamanan dicari dengan mencari bidang lemah pada struktur lapisan tanah. Faktor keamanan didapatkan dengan cara mengurangi nilai kuat geser tanah (*shear strength reduction method*) secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan. Secara matematis nilai faktor keamanan dirumuskan pada Persamaan 2.

$$\sum MSF = \frac{c}{c_{reduced}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{reduced}} \quad (2)$$

Dimana $\sum MSF$ adalah faktor keamanan yang juga merupakan faktor reduksi untuk $c_{reduced}$ dan $\phi_{reduced}$ yang diperoleh dari reduksi nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ) tanah hingga mengalami keruntuhan (*soil body collapse*). Secara umum model *Mohr-Coulomb* membutuhkan lima parameter yang akan mempengaruhi nilai factor keamanannya yaitu modulus young (E), *poission ratio* (ν), kohesi (c), sudut geser (Φ), serta sudut dilancy (ψ) (Hamdhan, 2013).

Parameter tanah

Paramater tanah yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil dari korelasi jenis-jenis tanah hasil pengklasifikasian dari pengujian SPT dengan parameter – parameter tanah empiris dari hasil penelitian beberapa ahli. Berat jenis diambil berdasarkan pendekatan empiris yang dijelaskan Donald P. Coduto (2016) dimana untuk jenis tanah lempung (*low-plasticity clays*) nilai berat jenis berada pada interval 12,5 – 17,5 kN/m³ untuk tanah yang berada di atas muka air tanah (*unsaturated*) dan 11,5 – 20,5 kN/m³ untuk tanah di bawah muka air tanah (*saturated*). Untuk jenis tanah lanau kepasiran (*silty sand*) berada pada interval 12,5 – 21 kN/m³ untuk tanah yang berada di atas muka air tanah dan 17,5 – 22 kN/m³ untuk tanah di bawah muka air tanah. Untuk jenis tanah pasir (*well-graded sands*) berada pada interval 15 – 21 kN/m³ untuk tanah yang berada di atas muka air tanah dan 19 – 23 kN/m³ untuk tanah dibawah muka air tanah.

Angka *poisson* diperoleh berdasarkan pendekatan empiris yang dijelaskan Joseph E. Bowles (1996) dimana untuk jenis tanah lempung angka *poisson* berada pada interval 0,1 – 0,3 (*clay unsaturated* karena tanah lempung berada diatas muka air tanah), jenis tanah lanau kepasiran angka *poisson* berada interval 0,3 – 0,35, dan jenis tanah pasir berada pada interval 0.1 - 1. Penetapan angka *poisson* yang digunakan disesuaikan kembali dengan konsistensi tanah mengingat nilai angka *poisson* akan semakin tinggi apabila pori batuan dapat terisi oleh fluida (Oh dan Vanapalli, 2011).

Nilai modulus elastisitas diperoleh berdasarkan pendekatan empiris yang juga dijelaskan Joseph E. Bowles (1996) dimana untuk jenis tanah lempung, berada adalah 15 – 50 Mpa sedang untuk tanah lanau kepasiran modulus elastisitas adalah 5 – 20 Mpa. Jenis tanah pasir diambil nilai modulus elastisitas sebesar 50 Mpa dari interval 50 – 81 Mpa. Penetapan nilai modulus elastisitas ini juga disesuaikan dengan konsistensi tanah mengingat semakin kecil nilai modulus elastisitas, semakin mudah suatu bahan mengalami deformasi.

Nilai kohesi dan sudut geser dalam (*friction angle*) diperoleh berdasarkan pendekatan empiris yang dijelaskan oleh Burt Look (2007), dimana untuk tanah lempung (*cohesive stiff*) nilai kohesi adalah 20 – 50 kPa dan untuk sudut geser 20 – 30°. Lapisan tanah lanau kepasiran (*cohesive hard*) sudut

geser adalah 25 – 30° dengan penyesuaian untuk nilai kohesi, karena tidak dijelaskan secara langsung jenis tanah lanau kepasiran tersebut. Lapisan tanah pasir (*very dense*) nilai sudut gesernya adalah 50° dengan nilai kohesi 1 kPa. Tanah pasir memiliki kohesi disini dikarenakan asumsi bahwa tanah pasir tersebut bukanlah tanah pasir murni. Nilai sudut *dilantancy* pada menggunakan *software* PLAXIS, ditentukan dengan Persamaan 3 (Ameratunga, 2016).

$$\psi = \phi'_{peak} - 30^\circ \quad (3)$$

Dari pendekatan – pendekatan empiris tersebut ditentukanlah parameter – parameter tanah seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1 sebagai *input* untuk analisis stabilitas lereng Jembatan Cikereteg pada *software* PLAXIS 2D versi 22.

Parameter perkuatan tambahan

Pemodelan dan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan tambahan dilakukan apabila pemodelan lereng eksisting dengan penggunaan *subdrain* belum dapat memenuhi kriteria lereng rencana. Pemodelan perkuatan tambahan akan dicoba dimodelkan dengan memvariasikan berbagai kemungkinan konstruksi untuk memperoleh kondisi paling yang efektif dari masing - masing perkuatan. Hasil paling efektif dinilai berdasarkan dari nilai faktor keamanan terbesar yang diperoleh dari variasi tersebut.

Tabel 1. Parameter tanah

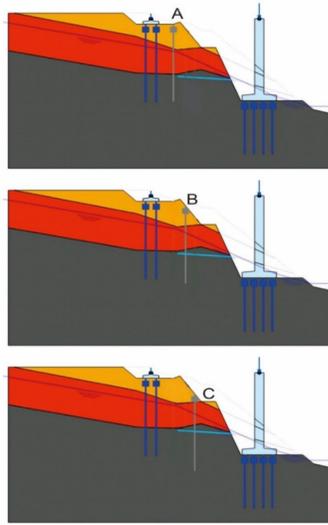
<i>Property</i>	Lempung medium teguh	Lanau kepasiran padat	Pasir sangat padat	Satuan
<i>Soil Model</i>	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
<i>Drainage Type</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	-
γ_{msat}	15	17	18	kN/m ³
γ_{sat}	16	20	22	kN/m ³
$v(nu)$	0,3	0,3	0,1	-
E'_{ref}	15000	20000	50000	kN/m ²
c'_{ref}	20,00	10,00	1,00	kN/m ²
ϕ	20,00	30,00	50,00	°
ψ			20	°

Tabel 2. Spesifikasi *bored pile*

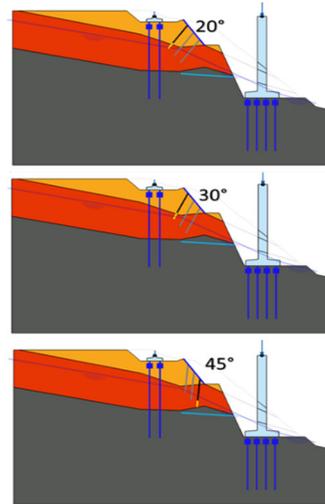
<i>Property</i>	Keterangan	Satuan
<i>Set type</i>	<i>Embedded beams</i>	-
<i>Material type</i>	<i>Elastic</i>	-
<i>Unit weight, γ</i>	24	kN/m ³
<i>L spacing</i>	Variasi: 3 4,5 6	M
<i>Cross section type</i>	<i>Predefined</i>	-
<i>Predefined cross section type</i>	<i>Solid circular beam</i>	-
<i>Diameter</i>	Varuasi: 0,6 0,8 1,2	M
<i>Modulus elasticity (E)</i>	25310275	kN/m ²
<i>Axial skin resistance</i>	<i>Layer dependent</i>	-
<i>Lateral resistance</i>	<i>Unlimited</i>	-
<i>Base resistance (F max)</i>	100	kN

Lereng dengan perkuatan *bored pile* dimodelkan dengan spesifikasi yang serupa dengan pondasi jembatan. Perkuatan *bored pile* dimodelkan dengan memvariasikan lokasi (seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10), kedalaman, spasi dan juga diameter tiang bor, sehingga diperoleh spesifikasi *bored pile* untuk input pada software PLAXIS seperti ditunjukkan oleh Tabel 2. Lokasi pemasangan *bored pile* didasarkan pada bidang gelincir setelah dipasang *subdrain*, dimana *bored pile* harus dibenamkan sampai memotong bidang gelincir.

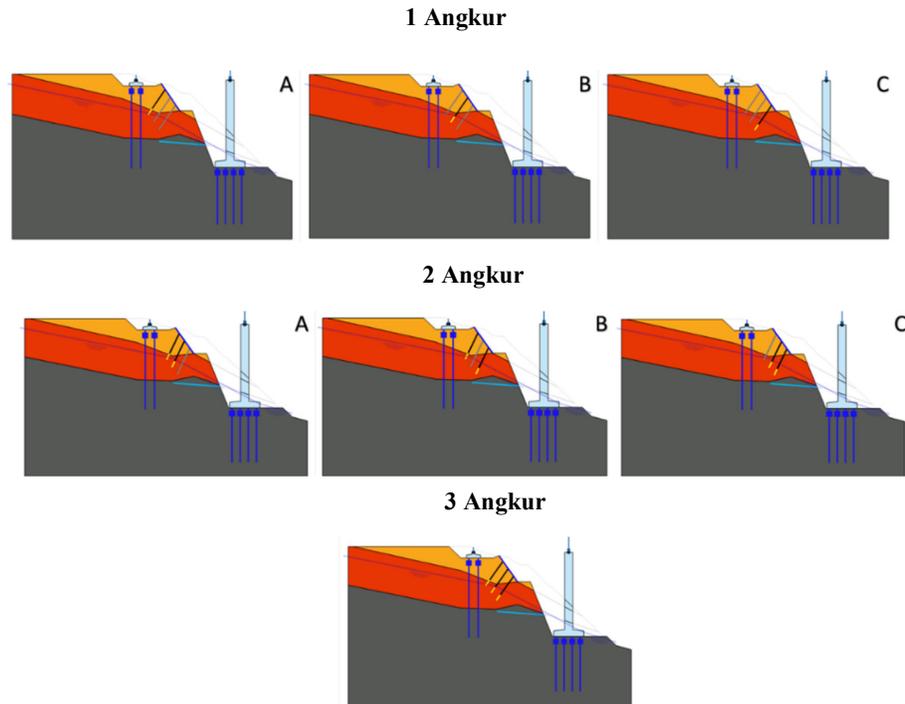
Perkuatan *ground anchor* dimodelkan dengan memvariasikan sudut pemasangan angkur seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11. Sedangkan jumlah dan lokasi diperlihatkan pada Gambar 12, serta spasi horizontal. Pemilihan lokasi didasarkan pada bidang gelincir setelah dipasang *subdrain* yang dimana harus dipasang memotong bidang keruntuhan yang terdapat pada lapisan lempung dan diangkurkan ke lapisan tanah yang cukup stabil (syarat NSPT ≥ 20 untuk tanah kohesif). Sehingga spesifikasi *ground anchor* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 10. Variasi lokasi perkuatan *bored pile*



Gambar 11. Variasi sudut pemasangan angkur



Gambar 12. Variasi jumlah dan lokasi perkuatan *ground anchor*

Tabel 3. Spesifikasi *ground anchor*

<i>Property</i>	<i>Keterangan</i>			<i>Satuan</i>
<i>Anchored wall</i>				
<i>Material model</i>	<i>Plates</i>			
Tebal dinding	0,5			m
Berat dinding (w)	12			kN/m/m
Kekakuan aksial (EA)	151.000.000			kN/m
Kekakuan lentur (EI)	3.100.000			kN/m ² /m
<i>Anchor rod / Tendon / Unbounded</i>				
<i>Material model</i>	<i>Anchors</i>			
Panjang <i>unbounded</i>	10			m
Spasi	2	4	6	m
Kekakuan aksial (EA)	200.000			kN
Gaya prategang	100			kN
<i>Bond / Grout body</i>				
<i>Material model</i>	<i>Geogrids</i>			
Panjang	3			m
Kekakuan aksial (EA)	200.000			kN/m

Beban Gempa

Salah satu metode untuk menganalisis gempa adalah metode pseudostatik, yang merubah gaya yang timbul akibat beban gempa yang berbentuk dinamik menjadi statik dengan menerapkan gaya lateral yang bekerja melalui pusat massa yang bertindak ke arah luar lereng. Selain itu menggunakan koefisien seismik yang didapatkan dari percepatan puncak dari permukaan (*PGA*) dengan penentuan kelas situs pada lokasi tanah tersebut seperti yang disyaratkan pada SNI 8460:2017. Pada metode ini gempa arah vertikal diabaikan, karena pada umumnya percepatan gempa arah vertikal lebih kecil dari pada gempa horizontal sehingga percepatan gempa vertikal tidak begitu menentukan dalam penghitungan gaya lateral yang bekerja pada lereng.

Berdasarkan SNI 1726:2019, profil tanah di situs harus diklasifikasikan sesuai dengan tabel klasifikasi situs berdasarkan pada profil tanah lapisan 30 m paling atas. Klasifikasi situs diambil dari uji penetrasi standar lapangan rata – rata. Data tanah yang memenuhi kriteria tersebut adalah data tanah borlog NDB – 41 dan dari hasil perhitungan diperoleh nilai penetrasi standar rata – rata sebesar 8,02 yang mana digolongkan kedalam kelas situs SE (tanah lunak) sesuai ketentuan pada SNI 1726:2019.

Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik. Dalam menentukan faktor amplifikasi tersebut diperlukan parameter respons spektral percepatan gempa yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs. Maka setelah menentukan klasifikasi situs, data koordinat lokasi dan hasil klasifikasi situs tersebut dimasukkan kedalam

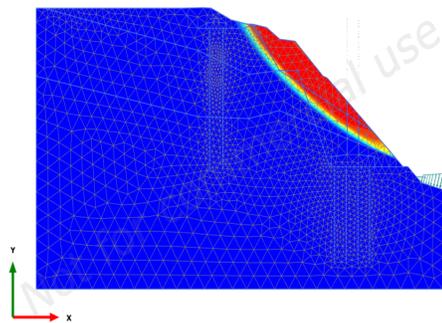
program Desain Spektral Indonesia untuk memperoleh nilai parameter respons spektral percepatan gempa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.

Nilai percepatan gempa (*PGA*) kemudian disesuaikan dengan ketentuan pada SNI 1726:2019 sehingga diperoleh faktor amplifikasi seismik sebesar 0,9. Nilai percepatan spektral dan faktor amplifikasi tersebut digunakan untuk dapat menghitung nilai koefisien seismik (*kh*) dan koefisien gempa (*a*). Menurut Hoek and Bray (1981), percepatan hasil dari koefisien seismik akan sama dengan 50% dari *PGA* yang menunjukkan bahwa perpindahan seismik akan kurang dari 1 m. Koefisien gempa (*a*) sendiri dapat ditentukan berdasarkan nilai koefisien seismik (*kh*) dikalikan dengan nilai faktor amplifikasi (*F_{PGA}*). Sehingga diperoleh masing – masing nilai sebesar *kh* = 0,2505 dan *a* = 0,2254. Nilai koefisien gempa ini akan menjadi *input* untuk analisis gempa metode pseudostatik pada *software* PLAXIS 2D versi 22.

Gambar 13. Nilai parameter respons spektra percepatan gempa pada Jembatan Cikereteg

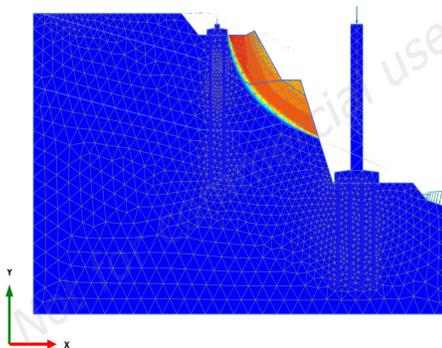
Hasil dan Pembahasan

Analisis stabilitas lereng Jembatan Cikereteg pada kondisi eksisting atau tanpa perkuatan, dimodelkan untuk mengetahui lokasi bidang kelongsoran dan nilai faktor keamanan sebelum dan setelah adanya jembatan. Hasil dari pemodelan lereng sebelum adanya jembatan menunjukkan bahwa pola keruntuhan terletak pada kaki lereng (*toe failure*) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 14 dengan nilai faktor keamanan lereng sebesar 1,109 saat kondisi statis dan nilai faktor keamanan kurang dari 1 ($FK < 1$, dinyatakan *collapse* oleh *software PLAXIS*) saat kondisi gempa



Gambar 14. Hasil simulasi pemodelan lereng sebelum ada jembatan

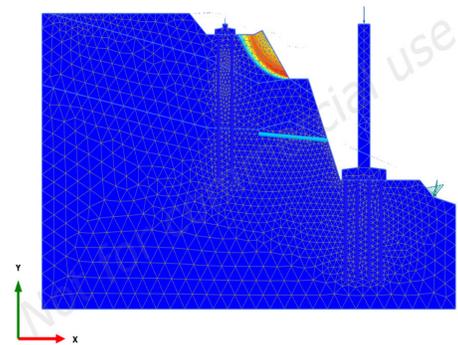
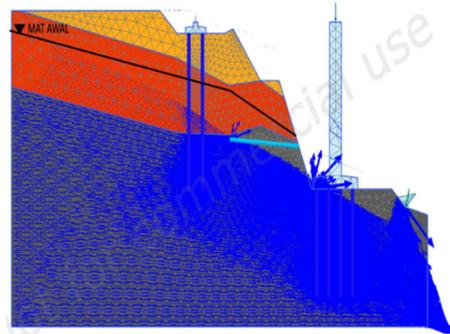
Hasil dari pemodelan lereng setelah adanya jembatan menunjukkan pembangunan jembatan mengakibatkan perubahan pada pola keruntuhan lereng dari keruntuhan kaki (*toe failure*) menjadi keruntuhan muka (*face failure* atau *slope failure*) yang disebabkan oleh pemotongan lereng yang menyebabkan perubahan sudut dan ketebalan lapisan tanah di permukaan lereng sehingga lapisan di permukaan lereng yang menjadi lemah dan mengalami kelongsoran.



Gambar 15. Hasil simulasi pemodelan lereng setelah ada jembatan

Namun fondasi abutment jembatan membantu untuk menahan deformasi yang terjadi akibat

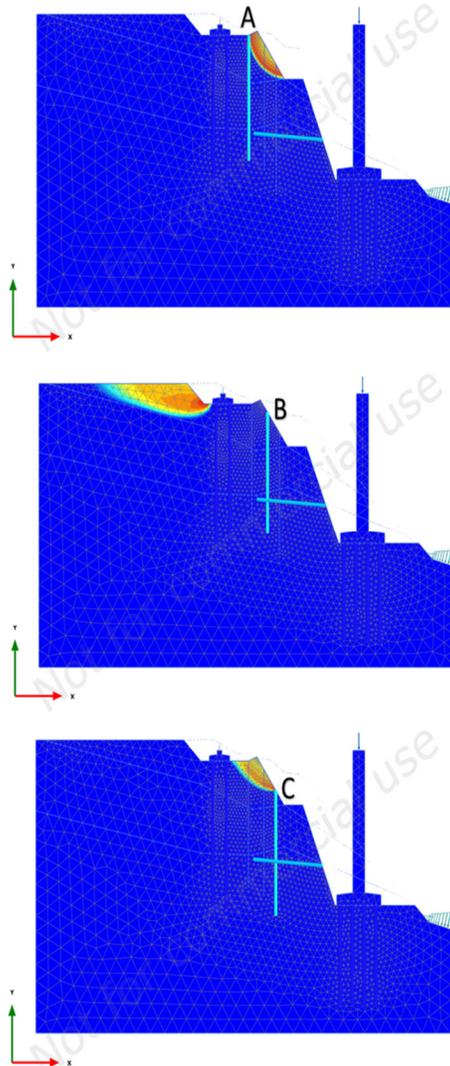
pemotongan lereng, sehingga tidak menurunkan kestabilan lereng. Hal ini seperti yang dapat dilihat pada Gambar 15 dan dibuktikan dengan nilai faktor keamanan lereng yang justru naik sebesar 25 % menjadi 1,396 saat kondisi statis dan 1,068 saat kondisi gempa. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa kecurigaan mengenai kestabilan lereng Jembatan Cikereteg adalah benar dimana nilai faktor keamanan tersebut belum dapat memenuhi kriteria lereng rencana. Analisis stabilitas lereng Jembatan Cikereteg kemudian dilanjutkan dengan pemodelan dengan *subdrain* untuk mengetahui pengaruhnya sebagai metode penanganan lereng di lapangan.



Gambar 16. Penurunan muka air tanah dan hasil simulasi pemodelan lereng dengan penggunaan *subdrain*

Hasil dari pemodelan lereng dengan penggunaan *subdrain* ini menunjukkan pengaruh penurunan muka air tanah akibat pemasangan *subdrain* ini menyebabkan adanya perubahan area bidang gelincir pada lereng, yang mana berpindah ke area *ramp* yang menandakan hanya lapisan tanah paling atas yaitu lapisan tanah lempung lunak sajalah yang mengalami keruntuhan (berkurangnya area keruntuhan) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 16. Perubahan gelincir ini terjadi dikarenakan hilangnya berat air (tegangan/tekanan air pori) pada lapisan tanah lanau kepasiran akibat turunnya muka air tanah yang mengurangi beban tanah (tegangan total) pada area lapisan tanah yang rawan longsor tersebut sehingga dapat

meningkatkan stabilitas lereng yang dibuktikan dengan meningkatnya nilai faktor keamanan yang naik menjadi 1,622 saat kondisi statis dan 1,245 saat kondisi gempa. Namun nilai faktor keamanan tersebut masih belum memenuhi kriteria rencana lereng yang disyaratkan, sehingga perlu dilakukan pemodelan perkuatan tambahan untuk penanganan lereng tersebut. Analisis dilanjutkan dengan pemodelan lereng dengan perkuatan tambahan *bored pile* dan *ground anchor* yang diharapkan dapat menjadi masukan dalam perencanaan solusi geoteknik untuk pencegahan ataupun penanganan longsoran pada konstruksi Jembatan Cikereteg.

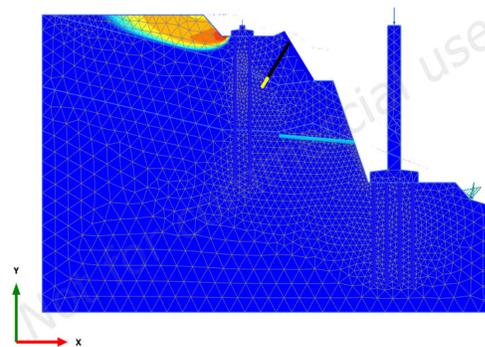


Gambar 17. Hasil simulasi pemodelan lereng dengan perkuatan *bored pile*

Hasil dari pemodelan lereng dengan perkuatan tambahan *bored pile*, dinilai paling efektif dari variasi – variasi yang telah ditentukan sebelumnya, berada pada lokasi B dimana memiliki nilai faktor

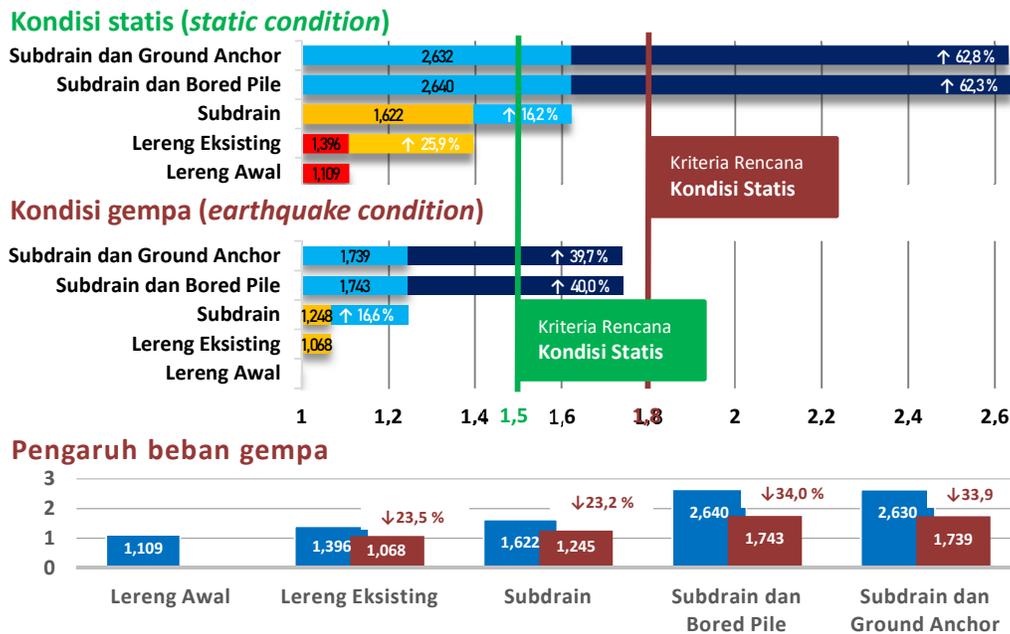
keamanan sebesar 2,640 saat kondisi statis dan 1,743 saat kondisi gempa. Pola keruntuhan pada setiap lokasi diperlihatkan pada Gambar 17 yang dimana bidang keruntuhan pada lokasi B berpindah ke belakang abutment jembatan yang menyatakan bahwa sudah tidak terjadi deformasi pada area rawan yang diberikan perkuatan, sedangkan pada lokasi A dan C hanya mengecilkan area dari bidang keruntuhan sebelum dipasang perkuatan tambahan sehingga dapat dikatakan masih terjadi deformasi di area tersebut. Dari hasil pemodelan pada penelitian ini dapat diketahui bahwa faktor lokasi pemasangan *bored pile* sangat mempengaruhi stabilitas lereng yang dapat dilihat dari nilai faktor keamanannya.

Hasil dari pemodelan lereng dengan perkuatan tambahan *ground anchor* dilihat dari pola keruntuhan dan nilai faktor keamanan, semuanya memberikan dampak dan nilai yang relatif sama dimana area bidang keruntuhan berpindah ke belakang abutment jembatan seperti diperlihatkan pada Gambar 18 yang menyatakan bahwa sudah tidak terjadi deformasi pada area yang diberikan perkuatan serta memiliki nilai faktor keamanan kurang lebih sebesar 2,63 saat kondisi statis dan 1,739 saat kondisi gempa. Dari hasil pemodelan pada penelitian ini dapat diketahui bahwa faktor variasi yang coba diterapkan pada pemodelan lereng dengan penggunaan *ground anchor* ini tidak memberikan pengaruh yang signifikan.



Gambar 18. Hasil simulasi pemodelan lereng dengan perkuatan *ground anchor*

Meninjau metode perkuatan tambahan yang direkomendasikan untuk menangani permasalahan lereng Jembatan Cikereteg, maka hasil – hasil pemodelan yang telah dipaparkan sebelumnya dirangkum dalam sebuah grafik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 19. Dari grafik tersebut dapat diketahui, pengaruh beban gempa menurunkan stabilitas lereng sebesar 23% sampai dengan 35% atau 1/4 sampai dengan 1/3 dari kondisi statis. Penggunaan *subdrain* mampu meningkatkan stabilitas lereng sebesar 16% dari kondisi eksisting namun belum dapat meningkatkan hingga memenuhi kriteria rencana.



Gambar 19. Grafik rekapitulasi hasil – hasil pemodelan

Perkuatan tambahan, baik perkuatan *bored pile* dan *ground anchor* sama – sama mampu meningkatkan stabilitas lereng sebesar 62% dari kondisi lereng dengan penggunaan *subdrain* dan juga memenuhi kriteria rencana lereng, sehingga keduanya dapat menjadi alternatif penanganan lereng untuk Jembatan Cikereteg. Dapat dilihat juga dari besaran nilai faktor keamanan yang diperoleh kedua perkuatan tersebut memiliki perbedaan yang sangat kecil atau dapat dikatakan sama. Untuk menentukan rekomendasi perkuatan yang efektif, perlu dibandingkan dari segi biaya (keekonomisan) dan metode konstruksi (kemudahan pengerjaan).

Kesimpulan

Berdasarkan pemodelan lereng abutment (A1) dan pilar (P1) Jembatan Cikereteg, diketahui bahwa kecurigaan mengenai kestabilan lereng adalah benar dimana nilai faktor keamanan jauh dari kriteria rencana. Penanganan lereng dengan *subdrain* juga belum dapat meningkatkan stabilitas lereng hingga memenuhi kriteria rencana, sehingga diperlukan perencanaan perkuatan tambahan.

Perkuatan tambahan yang dimodelkan, baik *bored pile* ataupun *ground anchor* ini dapat menjadi alternatif untuk penanganan lereng. Dari pemodelan yang dilakukan juga, dapat diketahui potensi gempabumi perlu dipertimbangkan dalam penanganan lereng, karena dapat menurunkan stabilitas lereng, hingga 1/4 sampai dengan 1/3 dari kondisi statis.

Daftar Pustaka

- Akhirianto, N. A., & Naryanto, H. S. (2016). Kajian Kapasitas dan Persepsi Masyarakat Terhadap Bencana Tanah Longsor di Desa Marga Mukti, Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung. *Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia Vol.2 No.2*, 2, 117-126.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. New Delhi: Springer.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Brinkgreve, R., Kumarswamy, S., Swolfs, W., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P., & Haxaire, A. (2016). *Reference Manual*. Netherlands: PLAXIS.
- Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M.-c. R. (2016). *Foundation Design, Principles and Practice* (3rd ed.). Pomona: California State Polytechnic University.
- Department of Transportation. (2011). *Trenching and Shoring Manual*. California: Office of Structure Construction.
- Dharmayasa, I. P., & Utami, D. A. (2017). Analisis Pengaruh Beban Gempa dan Pondasi Tiang Bor Terhadap Keamanan Lereng di Tegalalang, Gianyar-Bali. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 11* (pp. 65 - 74). Jakarta: Universitas Tarumanagara.

- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2005). *Manual Penanganan Lereng Jalan Buku 1 Petunjuk Umum*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Griffiths, D., & Lane, P. (1999). Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Geotechnique*, 387-403.
- Hamdhan, I. N. (2013). A Contribution to Slope Stability Analysis with the Finite Element Method. *Graz University of Technology. Technische Universität Graz*, 18 - 21.
- Hamdhan, I. N., & Iskandar, F. F. (2019). Analisis Perkuatan Timbunan Di Atas Tanah Lunak Menggunakan Dinding Turap dengan Pendekatan Model Numerik. *MKTS UNDIP*.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering* (3th ed.). London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- Kementerian PUPR. (2022). Contoh Daftar HSD Bahan dan Olahan. In *Pedoman Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil Bagian III : Analisis Harga Satuan Pekerjaan Bidang Bina Marga* (pp. 955 - 958). Jakarta.
- Lestari, E. (2017, November). Sistem Drainase Aliran Bawah Tanah untuk Daerah Rawan Longsor (Studi Kasus Sub DAS Sungai Cikapundung, Bandung). *Jurnal Forum Mekanika*, 6 No.2, 81-87.
- Liang, R., & Zeng, S. (2022, April). Slope Stability of Drilled Shaft Reinforcement Slope. *Soils and Foundations*, 42 No.2, 93 - 102.
- Liong, G. T., & Herman, D. G. (2012). Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium vs Finite Element Method. *Pertemuan Ilmiah Tahunan 16 (PIT-XVI)*. Jakarta: HATTI.
- Look, B. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group.
- Mina, E., Kusuma, R. I., & Dwimanda, S. (2014). Analisis Kelongsoran Galian Basement Menggunakan Dinding Penahan Soldier Pile dengan Software Plaxis. *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil Vol.3 No.2*.
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2011). Relationship between Poisson's ratio and Soil Suction for Unsaturated Soils. *5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*. Pattaya.
- Pangemanan, V. G. (2014). Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Fellenius. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado*.
- Prastyo, R. D., & Hambali, R. (2014). Analisis Potensi Longsor pada Lereng Galian Penambangan Timah di Jelitik. *Fropil*.
- Santi, P. M., & Elifrits, C. D. (2001). *Landslide Stabilization Using Wick Drains*. Washington: Transportation Research Board, National Research Council.
- SNI 1726:2019. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 8460:2017. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sompie, G. E., Sompie, O., & Rondonuwu, S. (2018). Analisis Stabilitas Tanah dengan Model Material Mohr-Coulomb dan Soft-Soil. *Jurnal Sipil Statik Vol.6 No.10*, 783-792.
- Widisaputra, R., Zakaria, Z., Sophian, R. I., Iqbal, P., & Permana, H. (2020). Pengaruh Beban Gempa Terhadap Kestabilan Lereng Tanah Daerah Liwa dan Sekitarnya, Kabupaten Lampung Barat, Lampung. *Padjadjaran Geoscience Journal*.
- Xanthakos, P. (1991). *Ground Anchors and Anchored Structures*. New York: John Wiley & Sons.
- Zakaria, Z., Ismawan, & Haryanto, I. (2011, April). Identifikasi dan Mitigasi pada Zona Rawan Gempa Bumi di Jawa Barat. *Bulletin of Scientific Contribution : Geology*.