

Simulasi Respon Tanah Lempung Kelanauan (*Silt Clay*) Terhadap Beban Struktur Box Culvert Menggunakan Plaxis 2d

Putu Angga Bagus Setyawan^{1*}, I Nengah Sinarta²

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

e-mail: anggaputu430@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

e-mail: inengahsinarta@warmadewa.ac.id

ABSTRAK

Perencanaan Box Culvert memerlukan analisis geoteknik yang akurat untuk menjamin kestabilan dan keamanan konstruksi, khususnya pada kondisi tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*) yang memiliki sifat kompresibel tinggi serta daya dukung yang relatif rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*) terhadap respon struktur Box Culvert dengan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D berbasis metode elemen hingga. Analisis dilakukan melalui dua aspek utama, yaitu penurunan tanah (*settlement analysis*) dan deformasi (*deformation analysis*) yang terjadi akibat pengaruh beban lalu lintas maupun berat struktur di atas tanah dasar. Parameter masukan berupa berat isi tanah, modulus elastisitas, rasio Poisson, kohesi, dan sudut geser dalam diperoleh dari hasil korelasi parameter geoteknik berdasarkan literatur dan data hasil uji tanah. Simulasi dilakukan dengan memodelkan kondisi tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*) pada lapisan dasar dan memperhitungkan interaksi tanah–struktur secara dua dimensi untuk mendapatkan respon deformasi yang representatif terhadap kondisi lapangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa karakteristik tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*) secara signifikan mempengaruhi besarnya penurunan dan deformasi di sekitar area struktur, di mana nilai deformasi maksimum umumnya terjadi di bawah pondasi Box Culvert, sedangkan zona timbunan menunjukkan potensi pergeseran lateral yang perlu diperhatikan terhadap stabilitas konstruksi. Melalui pendekatan numerik ini, diperoleh gambaran yang lebih realistis mengenai interaksi tanah dan struktur, sehingga hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam perencanaan, evaluasi, serta optimasi desain Box Culvert pada kondisi tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*).

Kata kunci: Box Culvert, Tanah Lempung Kelanauan (*Silt Clay*), PLAXIS 2D, Penurunan Tanah, Deformasi

1. PENDAHULUAN

Jalan Denpasar-Gilimanuk merupakan salah satu jalan nasional tersibuk di Provinsi Bali. Hal ini dikarenakan jalan tersebut berfungsi sebagai jalur utama yang menghubungkan pulau Sumatera, Jawa, Bali, dan Lombok. Sebagian besar transportasi logistik besar yang melibatkan Bali melewati rute ini. Karena tingginya intensitas lalu lintas, jalan Denpasar-Gilimanuk sering mengalami kemacetan, terutama pada ruas di Kecamatan Mengwi, Kabupaten Badung. Kemacetan di wilayah ini sering disebabkan oleh berbagai faktor, salah satunya adalah aktivitas pasar Bajera pada hari-hari tertentu yang meningkatkan volume kendaraan yang melintasi jalan tersebut (Darma Yoga, 2023).

Di Ruas jalan Nasional Denpasar-Gilimanuk pada STA 38+725, terjadi penurunan permukaan jalan atau ambles yang disebabkan oleh kerusakan pada gorong-gorong saluran air di bawahnya. Hal ini mengindikasikan adanya ketidaksesuaian antara desain gorong-gorong terdahulu dengan kondisi nyata di lapangan, terutama terkait aspek geoteknik yang berperan dalam kestabilan struktur. Faktor-faktor seperti tipe tanah, kapasitas dukung tanah, serta risiko erosi akibat aliran air yang kuat sangat penting untuk diperhatikan agar desain dan konstruksi box culvert dapat berhasil.

Oleh karena itu, simulasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kondisi tanah dan struktur penyangga, sehingga dapat mendukung upaya perbaikan serta pengelolaan infrastruktur jalan nasional secara lebih efektif dan berkelanjutan. Selain itu, hasil simulasi yang diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengambilan keputusan teknis yang tepat.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Box culvert

Box culvert merupakan salah satu jenis konstruksi beton bertulang yang umumnya diaplikasikan pada pekerjaan saluran air, dengan bentuk menyerupai kotak atau segi empat. Keberadaan struktur ini sangat penting karena selain berfungsi sebagai media aliran, juga mampu memberikan perlindungan terhadap terjadinya kerusakan di sekitar bangunan air. Salah satu manfaat utamanya adalah dapat meminimalkan risiko local scouring atau gerusan lokal, yaitu

fenomena penurunan mendadak pada elevasi dasar di sekitar pondasi atau pilar bangunan akibat tergerusnya material tanah. Kondisi tersebut biasanya dipicu oleh tingginya kecepatan aliran air yang membawa sedimen, sehingga penggunaan box culvert dinilai efektif untuk menjaga kestabilan tanah dasar dan keberlanjutan fungsi saluran (Rena Fajri Romdani, 2022). Berikut contoh gambar precast Box Culvert dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Precast Box Culvert
Sumber: indoprecast.com

Tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*)

Tanah lempung kelanauan (*silt-clay*) adalah jenis tanah berbutir halus yang terdiri dari campuran partikel lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) dengan dominasi fraksi lempung; komposisi ini menyebabkan tanah bersifat kohesif dan menunjukkan perilaku plastis saat basah karena aktivitas mineral lempungnya. Tanah jenis ini memiliki kemampuan menahan air relatif baik (permeabilitas rendah) sehingga cenderung menyimpan kelembapan, namun sensitif terhadap perubahan kadar air - ketika mengalami penambahan air dapat mengembang (*swelling*) dan saat mengering dapat menyusut (*shrinkage*), yang berdampak pada perubahan volume dan penurunan kuat geser (Victor Otto Iskandar, 2017). Contoh tanah lempung kelanauan dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Tanah Lempung Kelanauan (*silt-clay*)

Analisis geoteknik

Analisis geoteknik berperan penting dalam perencanaan Box Culvert, karena kestabilan dan keamanan struktur sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah di lokasi pemasangan. Melalui analisis ini, diperoleh parameter penting seperti penurunan tanah dan deformasi yang digunakan untuk menentukan potensi pergeseran di sekitar culvert.

PLAXIS 2D merupakan perangkat lunak yang banyak digunakan dalam bidang rekayasa geoteknik untuk melakukan analisis deformasi serta penurunan tanah pada proses perancangan. Aplikasi ini dipilih karena kemampuannya mensimulasikan berbagai kondisi pembebanan guna mempelajari respons tanah terhadap beban tersebut secara lebih realistis (Mughnisa Djalil & Noer Hamdhan, 2025).

3. METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi penelitian

Lokasi perencanaan terletak pada ruas Jalan Nasional Denpasar–Gilimanuk, tepatnya di STA 38+725. Lokasi ini termasuk wilayah Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali. Titik tersebut merupakan bagian jalur nasional yang padat lalu lintas, di mana ditemukan kerusakan berupa amblesnya perkerasan jalan akibat kegagalan pada saluran air (box culvert) eksisting. Berikut lokasi penelitian, dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Lokasi Penelitian

Data tanah

Berdasarkan hasil analisa tes sondir dan boring, disimpulkan bahwa daya dukung tanah di area tersebut memiliki nilai tanah keras. Tanah keras yang mencapai kekuatan tekan 250 kg/cm^2 berada pada kedalaman 4.40 meter sampai dengan 7.40 meter dari muka tanah setempat. Berdasarkan pengujian boring diperoleh dari kedalaman 0.00 meter hingga 3.00 meter berupa lempung kelanuan coklat muda. Kemudian dari kedalaman 3.00 meter sampai 6.00 meter berupa lempung kelanuan kecoklatan. Tidak ditemukan muka air tanah.

Parameter-parameter yang digunakan meliputi berat isi tanah kering (γ_{unsat}), berat isi tanah jenuh (γ_{sat}), modulus elastisitas awal (E_{soref}), modulus oedometer (E_{oedref}), modulus unloading/reloading (E_{urref}), rasio Poisson (ν), kohesi efektif (c'), sudut geser dalam (ϕ'), serta sudut dilatansi (ψ). Pemilihan model konstitutif tanah seperti Hardening Soil (HS), Hardening Soil with Small Strain (HS-Small), dan Linear Elastic juga mengacu pada panduan tersebut.

Korelasi nilai-nilai parameter tersebut telah banyak digunakan dalam penelitian maupun perancangan numerik geoteknik, karena mencakup berbagai jenis tanah (pasir, lempung, dan lanau) serta mempertimbangkan pengaruh regangan kecil terhadap perilaku deformasi tanah. Dengan demikian, seluruh data input tanah pada penelitian ini bersumber dari satu referensi utama yang kredibel, yaitu manual material model resmi PLAXIS (Reza Satria Warman, 2019). Berikut tabel nilai parameter tanah input pada PLAXIS 2D dapat dilihat pada tabel 1.






Tabel 1 Nilai Parameter Tanah Input PLAXIS 2D

Layer (kedalaman)	Model PLAXIS (saran)	γ_{unsat}	γ_{sat}	E50ref (kN/m ²)	Eoedref (kN/m ²)	Eurref (kN/m ²)	ν	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	ψ (°)
0.00 – 3.00 m	<i>Soft Soil</i> (SS) atau <i>Hardening Soil Small Strain (HS- small)</i>	17	18	1,500	1,500	4,500	0.35	0 (≈ 0)	18	0
3.00 – 4.40 m	<i>Hardening Soil (HS)</i>	18	19	5,000	5,000	15,000	0.3	0 (≈ 0)	20	2
4.40 – 7.40 m	<i>Linear Elastic</i> atau HS	20	22	1,000,000	1,000,000	3,000,000	0.25	1,000	35	5

Data berat kendaraan

Beban yang digunakan pada analisis ini merupakan beban kendaraan terakhir pada tabel klasifikasi kendaraan, yaitu kendaraan dengan total berat 33 ton atau setara dengan 323,62 kN. Nilai tersebut dipilih karena mewakili beban maksimum yang kemungkinan bekerja pada struktur Box Culvert, sehingga dapat menggambarkan kondisi paling kritis terhadap respon tanah dan kestabilan struktur. Dengan menggunakan beban tertinggi ini, hasil simulasi diharapkan memberikan gambaran yang realistis terhadap deformasi dan penurunan tanah akibat pengaruh beban kendaraan berat pada kondisi lapangan sebenarnya. Dalam analisis ini, hanya menggunakan beban dari satu kendaraan saja sebagai dasar perhitungan (Kementrian PUPR, 2018). Berikut tabel kelompok jenis kendaraan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 kelompok Jenis Kendaraan

Kategori	Bina Marga	Kelas	Jumlah Sumbu	Sketsa Kendaraan	Konfigurasi Sumbu	Nilai	Dimensi Jarak sumbu kendaraan berdasarkan EURO13 (m)					Berat maksimum berdasarkan JBI dan JBKl Kementerian Perhubungan (ton)						
							TP	A1	A2	A3	A4	A5	GVW	A1T	A2T	A3T	A4T	A5T
1	6b	40	2		1.2	min	2,99	2,99										
						maks	4,51	4,51					16	6	10			
2	7a	50	3		11.2	min	3,00	1,00	2,00									
						maks	8,92	1,91	7,01				21	5	6	10		
2	7a	51	3		1.22	min	3,00	2,00	1,00									
						maks	8,92	7,01	1,91				24	6	9	9		
2	7a	57	3		1.222	min	5,00	3,00	1,00	1,00								
						maks	14,03	9,01	2,51	2,51			30	6	8	8	8	
2	7a	58	4		11.22	min	4,00	1,00	2,00	1,00								
						maks	15,92	1,91	12,10	1,91			33	6	7	10	10	

Sumber: (Kementrian PUPR, 2018)

Berat sendiri box culvert

Nilai Input Struktur Box Culvert PLAXIS 2D menampilkan parameter-parameter material yang digunakan untuk memodelkan struktur box culvert dalam simulasi PLAXIS 2D. Nilai-nilai tersebut didasarkan pada spesifikasi produk pracetak berukuran 200 × 200 × 100 cm dengan mutu beton K-350 yang umum digunakan pada pekerjaan saluran air. Parameter tersebut digunakan untuk mendefinisikan perilaku struktur box culvert pada model elemen hingga di PLAXIS 2D. Secara keseluruhan, parameter dalam tabel ini berfungsi untuk memastikan bahwa perilaku struktur pada

simulasi dapat mencerminkan kondisi nyata di lapangan, khususnya dalam menahan beban kendaraan dan berat sendiri terhadap respon tanah lempung kelanauan di bawahnya. Berikut nilai input struktur box culvert dapat dilihat pada tabel 3.

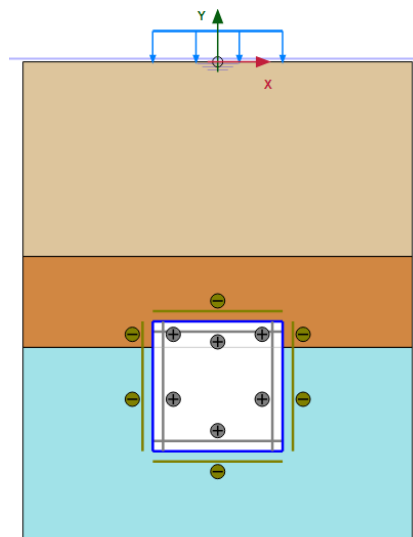
Tabel 3. Nilai Input Struktur Box Culvert PLAXIS 2D

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
Modulus Elastisitas	E	30.000.000	kN/m ²	Beton K-350
Tebal	t	0,20	m	Dinding culvert
Berat jenis	γ	24	kN/m ³	Berat sendiri beton
Poisson's Ratio	ν	0,20	–	Beton bertulang
Axial stiffness	EA	$6,00 \times 10^6$	kN/m	E x t
Bending stiffness	EI	$2,00 \times 10^4$	kN·m ² /m	E x t ³ / 12

Pemodelan dengan PLAXIS 2D

Pemodelan Box Culvert dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software PLAXIS 2D, yaitu salah satu perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) yang digunakan secara luas dalam bidang geoteknik untuk menganalisis perilaku interaksi antara tanah dan struktur. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui respon deformasi, penurunan (*settlement*).

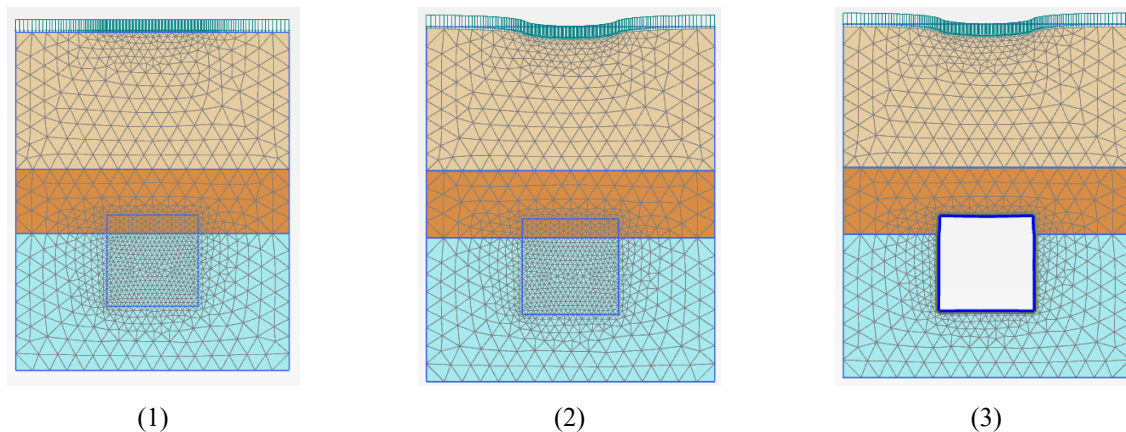
Tahapan pemodelan dilakukan secara sistematis, dimulai dari penentuan geometri, pemilihan model konstitutif tanah, pemberian parameter material tanah dan struktur, hingga penerapan kondisi batas dan pembebanan. Pemodelan dilakukan pada tampilan *plane strain*, karena bentuk struktur box culvert memanjang dengan dimensi panjang yang jauh lebih besar dibandingkan dengan lebar penampangnya, sehingga asumsi dua dimensi dianggap representatif untuk menggambarkan perilaku sebenarnya di lapangan. Berikut pemodelan box culvert pada PLAXIS 2D dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan Box Culvert PLAXIS 2D

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

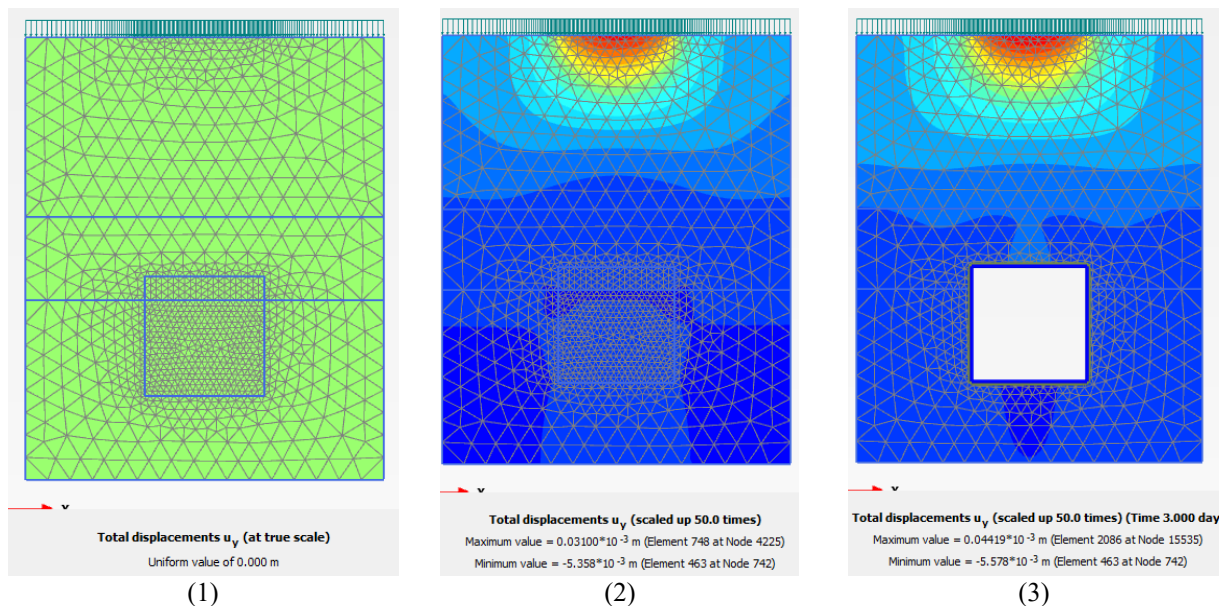
Deformed Mesh |u|



Gambar 5. (1) Sebelum dipengaruhi beban tambahan, (2) Setelah menerima beban tambahan berupa kendaraan, dan (3) Setelah seluruh beban bekerja (beban kendaraan dan struktur box culvert).

Dari gambar diatas, menyatkan bahwa kondisi (1) menunjukkan deformasi awal tanah sebelum menerima beban tambahan. Pada tahap ini, tanah hanya mengalami tegangan akibat berat sendiri (*self-weight*), sehingga deformasi yang terjadi masih kecil dan stabil, kondisi (2) menggambarkan deformasi tanah setelah menerima beban tambahan berupa kendaraan di permukaan. Beban ini meningkatkan tegangan vertikal pada lapisan tanah bagian atas, menyebabkan penurunan (*settlement*) dan deformasi yang lebih besar dibanding kondisi awal dan kondisi (3) memperlihatkan deformasi saat seluruh beban bekerja, yaitu gabungan antara beban kendaraan dan beban struktur box culvert. Pada tahap ini, distribusi tegangan menjadi lebih kompleks, terutama di bawah fondasi box culvert, sehingga terjadi deformasi maksimum pada lapisan tanah lempung di bawah struktur.

Total Displacement (u_y)



Gambar 6. (1) Sebelum terjadi penurunan, (2) Terjadi penurunan akibat beban kendaraan, dan (3) Terjadi penurunan akibat beban kendaraan dan struktur box culvert.

Dari gambar diatas, menyatakan bahwa Kondisi (1) menunjukkan keadaan awal tanah sebelum menerima beban

tambahan. Pada tahap ini, tanah hanya menahan berat sendiri (*self-weight*) tanpa pengaruh dari kendaraan maupun box culvert. Kontur warna masih seragam dan berintensitas rendah, menandakan deformasi belum terjadi. Nilai penurunan (*settlement*) tercatat 0 m., kondisi (2) menggambarkan saat beban kendaraan mulai bekerja di permukaan tanah. Tegangan vertikal meningkat terutama di lapisan atas, menyebabkan penurunan tanah di area bawah beban kendaraan. Kontur mulai menunjukkan gradasi warna dari biru ke merah di bagian atas, menandakan terjadinya deformasi vertikal. Nilai penurunan mencapai 0.03100 m dan kondisi (3) memperlihatkan kombinasi beban kendaraan dan beban permanen dari struktur box culvert. Distribusi tegangan menjadi lebih kompleks dan menyebabkan deformasi maksimum pada lapisan tanah lempung di bawah fondasi box culvert. Kontur warna merah yang lebih luas menandakan peningkatan displacement signifikan. Nilai penurunan tercatat 0.04419 m pada interval waktu 3 hari.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis simulasi menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*) memiliki tingkat kompresibilitas tinggi dan daya dukung rendah, sehingga sangat berpengaruh terhadap respon deformasi dan penurunan tanah di bawah struktur box culvert.
2. Hasil analisis *Deformed Mesh* menunjukkan bahwa deformasi awal tanah pada kondisi tanpa beban masih sangat kecil dan stabil. Ketika tanah menerima beban kendaraan, terjadi peningkatan tegangan vertikal yang menyebabkan deformasi lebih besar. Pada kondisi gabungan antara beban kendaraan dan beban struktur box culvert, deformasi maksimum terjadi tepat di bawah fondasi box culvert akibat konsentrasi tegangan yang tinggi.
3. Analisis Total *Displacement* (u_y) menunjukkan peningkatan penurunan tanah secara bertahap, yaitu sebesar 0,03100 m pada kondisi setelah menerima beban kendaraan, dan meningkat menjadi 0,04419 m ketika seluruh beban bekerja (kendaraan dan box culvert). Nilai ini menunjukkan bahwa kombinasi beban memberikan pengaruh paling signifikan terhadap penurunan tanah.
4. Pola kontur warna pada hasil simulasi menunjukkan bahwa daerah dengan warna merah berada di bawah fondasi box culvert, menandakan zona kritis deformasi maksimum. Hal ini menunjukkan pentingnya perkuatan tanah dasar atau peningkatan kapasitas dukung tanah untuk mencegah penurunan berlebih yang dapat mempengaruhi kestabilan struktur jalan di atasnya.
5. Pendekatan numerik menggunakan PLAXIS 2D terbukti mampu memberikan gambaran yang representatif terhadap perilaku interaksi tanah dan struktur, sehingga hasil simulasi ini dapat dijadikan acuan dalam perencanaan dan evaluasi desain box culvert pada kondisi tanah lempung kelanauan (*Silt Clay*) di lapangan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Darma Yoga, I. W. G. (2023). Analisis Kinerja Ruas Jalan Denpasar Gilimanuk Segmen Kecamatan Mengwi. *Reinforcement Review in Civil Engineering Studies and Management*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.38043/reinforcement.v2i1.4280>
- Kementrian PUPR. (2018). *Pengukuran beban kendaraan dengan weigh-in-motion (WIM) ridge*. www.bsn.go.id
- Mughnisa Djalil, N., & Noer Hamdhan, I. (2025). *Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan PLAXIS 2D : Studi Kasus di Jalan Nasional Weda STA 07+800*.
- Rena Fajri Romdani, A. A. M. (2022). Alternatif Struktur Box Culvert Sebagai Pengganti Girder Jembatan Kali Jompo, Jember. *Alternatif Struktur Box Culvert Sebagai Pengganti Girder Jembatan Kali Jompo, Jember*. <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST>
- Reza Satria Warman. (2019). *KUMPULAN KORELASI PARAMETER GEOTEKNIK DAN FONDASI*.
- Victor Otto Iskandar, E. P. A. (2017). *PERILAKU PENGEMBANGAN TANAH LEMPUNG AKIBAT PENGURANGAN BEBAN DI BANGUNAN BENUA INDAH PONTIANAK*. https://media.neliti.com/media/publications/192644-ID-perilaku-pengembangan-tanah-lempung-akib.pdf?utm_source=chatgpt.com