

**PERBANDINGAN ALTERNATIF PENANGANAN TANAH
PASCA LONGSOR PADA TIMBUNAN JALAN TOL**

TUGAS AKHIR

*Diajukan untuk melengkapi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Strata Satu
(S-1) pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas HKBP Nommensen Medan*

Disusun Oleh :

FRAEDERICK DANIEL PURBA
20310038

Telah diuji dihadapan Tim Penguji Tugas Akhir pada tanggal 30 Agustus 2024
dan dinyatakan telah lulus sidang sarjana

Disahkan oleh :

Dosen Pembimbing I



Bartholomeus, S.T., M.T

Dosen Pembimbing II



Humisar Pasaribu, S.T., M.T

Dosen Penguji I



Nurvita Insani M. Simanjuntak, S.T., M.Sc.

Dosen Penguji II



Ir. Yetty Riris Saragi, S.T., M.T., IPU., ACPE

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Pinbong Pangaribuan, M.T.

Ketua Program Studi



Ir. Yetty Riris Saragi, S.T., M.T., IPU., ACPE

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, Indonesia sedang mengalami periode yang sangat aktif dalam upaya meningkatkan pembangunan infrastruktur di seluruh negeri. Salah satu fokus utamanya adalah pada pengembangan sistem jalan tol yang merata dan terkoneksi dengan baik. Langkah-langkah yang ditempuh mencakup investasi besar-besaran, perencanaan yang cermat, serta pelaksanaan proyek-proyek infrastruktur dengan perhatian yang sangat teliti. Hal ini mencerminkan komitmen pemerintah untuk memperbaiki konektivitas dan mobilitas di Indonesia, serta memperkuat dasar ekonomi negara untuk masa depan yang lebih berkelanjutan. Jalan tol merupakan suatu prasarana transportasi yang dirancang khusus untuk menyediakan aksesibilitas yang cepat dan mudah bagi mobil khususnya. Umumnya perkerasan yang digunakan dalam pembangunan jalan tol yakni perkerasan kaku atau beton. Alasannya adalah karena perkerasan kaku memberikan kekuatan, stabilitas, dan daya tahan yang luar biasa yang dimana semuanya penting untuk menangani lalu lintas padat dan terus-menerus yang sering terlihat di jalan raya. Dibandingkan dengan perkerasan lentur atau aspal, perkerasan kaku mempunyai masa pakai yang lebih lama dan memerlukan perawatan yang lebih sedikit.

Namun, dalam suatu pekerjaan pembangunan jalan tol terdapat beberapa permasalahan tanah yakni salah satunya adalah masalah longsor, dimana pengertian dari tanah longsor itu sendiri adalah suatu jenis pergerakan yang melibatkan tanah, batuan, atau campuran keduanya, bergerak ke bawah atau menjauhi lereng akibat ketidakstabilan material penyusun lereng, yang memicu fenomena tersebut (Hartono, 2020).

Tanah lunak adalah tanah kohesif yang terdiri dari partikel-partikel yang sangat halus. Tanah lunak memiliki kekuatan geser yang rendah, kompresibilitas yang tinggi, dan daya dukung yang rendah, serta memiliki koefisien permeabilitas yang sangat rendah. Dalam studi kasus ini, penyebab utama terjadinya longsor adalah karena adanya akumulasi air yang terperangkap di bagian dasar timbunan. Hal ini

yang menyebabkan tanah di sekitar timbunan bersifat lunak sehingga membuat stabilitas timbunan di area tersebut menjadi terganggu.



Gambar 1.1 Daerah Longsor Di STA 103+300-STA 103+390

(Sumber: Dokumentasi Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)



Gambar 1.2 Daerah Longsor Di STA 103+300-STA 103+390

(Sumber: Geotechnical Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

Pada saat ini, banyak alternatif penanganan yang dapat digunakan dalam menghindari kelongsoran tanah. Di dalam penulisan karya ilmiah ini, penulis menggunakan alternatif perkuatan dengan *Mini Pile* ditambah LTP (*Load Transfer Platform*) dan tanpa LTP (*Load Transfer Platform*). Penanganan LTP terdiri dari LTP dengan geotekstil + granular dan *Slab On Pile*. Menganalisis stabilitas timbunan dan deformasi tanah secara manual dapat memakan waktu yang cukup lama. Untungnya, saat ini terdapat banyak pilihan perangkat lunak yang tersedia untuk perhitungan mekanika tanah, yang dapat memfasilitasi analisis yang lebih cepat untuk berbagai kondisi tanah.

Minipile adalah perkuatan yang biasanya digunakan dalam perbaikan stabilitas timbunan di jalan tol. Sistem pemasangan tiang *minipile* sama dengan sistem pemasangan tiang pancang pada umumnya. Perbedaan dari *minipile* dengan tiang

pancang yaitu bentuk dari kedua tiang tersebut. LTP (*Load Transfer Platform*) akan digunakan sebagai penanganan stabilitas timbunan di dalam penelitian ini yang akan digabungkan dengan perkuatan *minipile*. LTP yang digunakan berupa geotekstil + granular (misalnya pasir, kerikil, atau batu pecah) serta pelat beton bertulang (*Slab On Pile*).

1.2 Rumusan Masalah

Dengan mengacu pada konteks yang telah dijelaskan oleh penulis sebelumnya, maka penulis mengemukakan perumusan masalah adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana perbandingan stabilitas timbunan pada kondisi pelaksanaan konstruksi dan kondisi pada saat operasional.
- b. Bagaimana deformasi pada kondisi pelaksanaan konstruksi dan kondisi pada saat operasional.
- c. Bagaimana tingkat penurunan muka tanah (*settlement*) pada kondisi operasional.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah untuk melakukan evaluasi terhadap tiga (3) metode penanganan kelongsoran yang terjadi pada lokasi yang ditinjau yaitu *Minipile* tanpa LTP, *Minipile* dengan LTP geotekstil + granular, dan *Minipile* dengan LTP beton bertulang (*Slab On Pile*). Evaluasi yang dilakukan bertujuan untuk:

- a. Untuk mengetahui perbandingan stabilitas timbunan pada kondisi pelaksanaan konstruksi dan kondisi pada saat operasional.
- b. Untuk memprediksi deformasi akibat interaksi kepala tiang (*minipile*) dengan tanah pada kondisi pelaksanaan konstruksi dan kondisi pada saat operasional.
- c. Untuk memprediksi tingkat penurunan muka tanah (*settlement*) pada kondisi operasional.

1.4 Batasan Masalah

Permasalahan penelitian ini harus dibatasi agar lebih fokus dan tidak memerlukan penyelidikan yang berkepanjangan. Adapun pembatasan masalah adalah sebagai berikut:

- a. Penyusunan karya ilmiah ini hanya menggunakan parameter-parameter data sekunder yang diperlukan, yang diperoleh dari pengumpulan data yang berasal dari pihak terkait.
- b. Peninjauan data hanya terbatas pada segmen jalan tol Tebing Tinggi-Indrapura di STA 103+350, di mana terjadi longsoran yang begitu ekstrim di lokasi tersebut.
- c. Jenis alternatif penanganan yang akan dievaluasi pada penelitian ini yaitu perkuatan *Minipile* dengan LTP dan tanpa LTP. Penanganan berupa LTP terdiri dari LTP dengan geotekstil + granular dan *Slab On Pile*.
- d. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* geoteknik dengan metode *Finite Element*.
- e. Tidak melibatkan perencanaan anggaran biaya, waktu pelaksanaan serta metode pelaksanaan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Memperkenalkan dan memberikan pemahaman lebih lanjut tentang alternatif penanganan longsoran timbunan menggunakan *Minipile* dengan LTP dan tanpa LTP.
- b. Sebagai acuan dalam perencanaan menggunakan *Minipile* dengan LTP dan tanpa LTP pada penanganan longsoran timbunan.
- c. Diharapkan agar dapat menjadi perbandingan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

2.1.1 Pengertian Tanah

Tanah adalah campuran mineral, bahan organik, dan sedimen yang biasanya terakumulasi di atas lapisan batuan dasar. (Zerisa, 2022). Sedangkan menurut Winner et al. (2017), tanah adalah bahan yang terdiri dari butiran mineral individual yang tidak bergabung secara kimiawi, digabungkan dengan bahan organik yang sudah terurai menjadi partikel padat. Tanah juga mencakup zat cair dan gas yang menempati celah di antara partikel-partikel padat ini. Dapat ditarik kesimpulan bahwa tanah adalah material kompleks yang terdiri dari mineral, bahan organik, dan sedimen yang ditemukan di atas batuan dasar. Tanah juga mencakup butiran mineral lepas, bahan organik yang terurai, serta berbagai cairan dan gas yang menempati ruang di antara partikel padat.

2.1.2 Jenis Tanah

Menurut Afif & Hardiyanto (2022), terdapat dua (2) jenis tanah yang umum ditemukan dalam dunia konstruksi, yaitu tanah keras dan tanah lunak. Dimana dua jenis tanah ini memiliki sifat dan ciri-ciri yang berbeda. Adapun perbedaan dari kedua jenis tanah ini yaitu:

a. Tanah Lunak

Tanah yang dianggap tidak cocok untuk keperluan konstruksi disebut tanah lunak. Tanah lunak dicirikan oleh pengendapan yang tinggi dan daya dukung yang rendah. Tanah lunak tidak dapat dimanfaatkan sebagai pondasi bangunan atau jalan kecuali telah distabilkan atau diperbaiki untuk memenuhi kriteria sebagai lapisan pondasi atau tanah dasar untuk konstruksi jalan.

b. Tanah Keras

Karena sifat-sifatnya yang menguntungkan, tanah keras dapat digunakan sebagai bahan konstruksi. Tanah keras cocok digunakan sebagai pondasi bangunan atau jalan karena daya dukungnya yang kuat dan penurunan yang minimal sehingga memenuhi persyaratan sebagai lapisan pondasi atau lapisan tanah dasar untuk konstruksi jalan raya.

2.1.3 Unsur Partikel Tanah

Menurut Bowles dalam Dara & Rahmadani (2022), terdapat partikel-partikel yang terkandung di dalam tanah. Partikel-partikel tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Batu yang memiliki dimensi antara 250 hingga 300 milimeter dikategorikan sebagai batu besar, sementara lempengan batu besar disebut sebagai *Boulders*. Ungkapan "batu bulat" merujuk pada pecahan batu dengan ukuran berkisar antara 150 hingga 250 milimeter.
- b. Untuk partikel yang memiliki ukuran 5 milimeter sampai dengan 150 milimeter dikategorikan sebagai kerikil.
- c. Pasir adalah partikel batuan yang memiliki ukuran berkisar antara 0,074 mm hingga 5 mm, di mana partikel terbesarnya mencapai 3-5 mm dan yang terkecil berukuran 0,074 mm (kurang dari 1 mm).
- d. Lanau merupakan fragmen batuan yang memiliki ukuran berkisar antara 0,002 hingga 0,074 milimeter. Endapan yang terkumpul di dalam danau atau di sekitar muara sungai umumnya mengandung lumpur dan tanah liat dengan tingkat kandungan yang tinggi.
- e. Tanah liat adalah gabungan partikel mineral yang memiliki diameter kurang dari 0,002 milimeter, dan mereka merupakan penyebab utama kohesi dalam tanah yang menunjukkan sifat tersebut.
- f. Koloid merupakan partikel mineral yang memiliki ukuran lebih kecil dari 0,001 milimeter.

2.1.4 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Zahera et al. (2019), menyatakan bahwa kestabilan tanah dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan mekanik batuan yang membentuknya, yang meliputi penjelasan tentang sifat-sifatnya. Penjelasan dari berbagai sifat fisik tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Berat isi adalah perbandingan berat bahan terhadap volumenya, yang dinyatakan sebagai berat per satuan volume.
- b. Porositas adalah rasio antara volume ruang pori dan volume butiran-butiran itu sendiri.
- c. Derajat kejenuhan suatu tanah diukur melalui perbandingan antara volume air pori dengan total volume isi pori.

- d. Sudut patah yang dihasilkan oleh batuan yang terkena tegangan lebih besar dari tegangan gesernya disebut sudut geser internal.
- e. Kohesi mengacu pada gaya tarik menarik antara butiran batuan atau kepadatannya, diukur sebagai berat per satuan luas.

2.1.5 Klasifikasi Tanah

a. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Data Sondir

Informasi tentang jenis tanah dapat ditentukan melalui data tekanan *conus* (q_c) dan hambatan pelekat (f_s) yang diperoleh dari uji sondir, sebagaimana disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Data Sondir

| Hasil Sondir (kg/cm ²) | | Klasifikasi |
|---------------------------------------|-------------|---|
| q_c | F_s | |
| 6,0 | 0,15 – 0,40 | Humus, lempung sangat lunak |
| 6,0 – 10,0 | 0,20 | Pasir kelanauan lepas, pasir sangat lepas |
| | 0,20 – 0,60 | Lempung lembek, lempung kelanauan lembek |
| 10,0 – 30,0 | 0,10 | Kerikil lepas |
| | 0,10 – 0,40 | Pasir lepas |
| | 0,40 – 0,80 | Lempung atau lempung kelanauan |
| | 0,80 – 2,00 | Lempung agak kenyal |
| 30 – 60 | 1,50 | Pasir kelanauan, pasir agak padat |
| | 1,0 – 3,0 | Lempung atau lempung kelanauan kenyal |

| Hasil Sondir (kg/cm ²) | | Klasifikasi |
|---------------------------------------|-----------|---|
| qc | Fs | |
| 60 – 150 | 1,0 | Kerikil kepasiran lepas |
| | 1,0 – 3,0 | Pasir padat, pasir kelanauan atau lempung padat dan lempung kelanauan |
| | 3,0 | Lempung kekerikilan kenyal |
| 150 – 300 | 1,0 – 2,0 | Pasir padat, pasir kekerikilan, pasir kasar, pasir kelanauan sangat padat |

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, 1985)

Keterkaitan antara konsistensi dan tekanan *conus* dengan koefisien *undrained* adalah sejalan, di mana semakin tinggi nilai *c* dan *qc*, maka semakin tinggi kekerasan tanahnya, seperti yang tercermin dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hubungan Antara Konsistensi dengan Tekanan *Conus*

| Konsistensi Tanah | Tekanan Konus (<i>qc</i>) (kg/cm ²) | <i>Undrained Cohesion</i> (T/m ²) |
|---------------------|--|--|
| <i>Very Soft</i> | < 2,50 | < 1,25 |
| <i>Soft</i> | 2,50 – 5,0 | 1,25 – 2,50 |
| <i>Medium Stiff</i> | 5,0 – 10,0 | 2,50 – 5,0 |
| <i>Stiff</i> | 10,0 – 20,0 | 5,0 – 10,0 |
| <i>Very Stiff</i> | 20,0 – 40,0 | 10,0 – 20,0 |
| <i>Hard</i> | > 40,0 | > 20,0 |

(Sumber: Begeman, 1965)

1. Uji *Standard Penetration Test* (N-SPT)

Korelasi antara kepadatan, berat jenis tanah kering, nilai N-SPT, tekanan *conus* (q_c), dan sudut geser (ϕ) pada tanah adalah proporsional. Hal ini dapat diamati dalam Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3 Hubungan Antara Kepadatan, *Relative Density*, N-SPT, q_c , dan ϕ

| Kepadatan | <i>Relative Density</i> (γ_d) | Nilai N-SPT | Tekanan Konus (q_c) (kg/cm^2) | Sudut Geser (ϕ) |
|-----------------------------------|--|-------------|--|------------------------|
| <i>Very Loose</i> (Sangat Lepas) | < 0,2 | < 4 | < 20 | < 30 |
| <i>Loose</i> (Lepas) | 0,2 – 0,4 | 4 – 10 | 20 – 40 | 30 – 35 |
| <i>Medium Dense</i> (Agak Kompak) | 0,4 – 0,6 | 10 – 30 | 40 – 120 | 35 – 40 |
| <i>Dense</i> (Kompak) | 0,6 – 0,8 | 30 – 50 | 120 – 200 | 40 – 45 |
| <i>Very Dense</i> (Sangat Kompak) | 0,8 – 1,0 | > 50 | > 200 | > 45 |

(Sumber: Mayerhof, 1965)

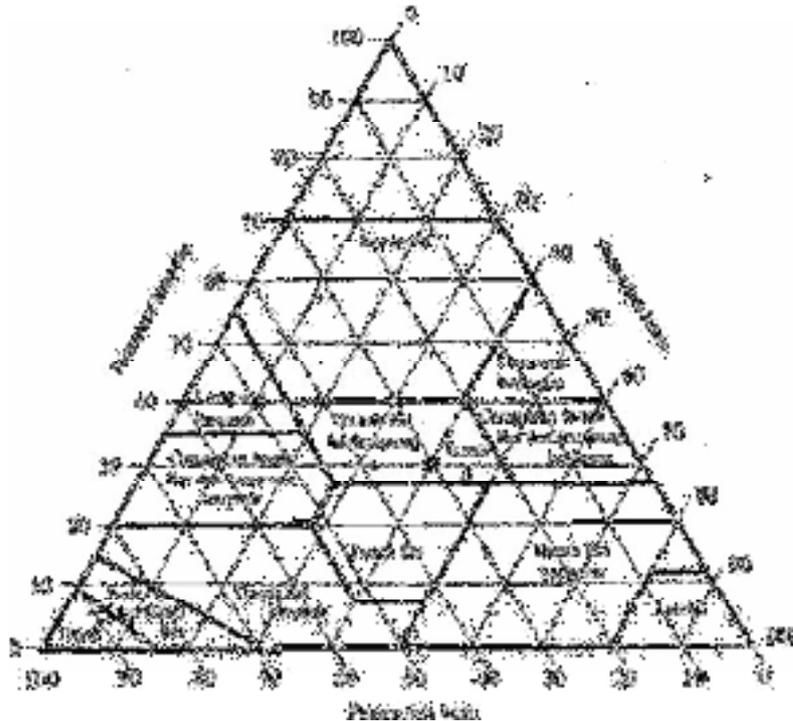
b. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Tekstur

Tekstur tanah dipengaruhi oleh perbedaan ukuran butirannya. Departemen Pertanian AS (USDA) mengkategorikan tanah menjadi berbagai jenis berdasarkan ukuran butirannya, seperti pasir, lanau, tanah liat, dan kerikil, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1.

Biasanya, tanah alami adalah gabungan dari butiran dengan ukuran yang beragam. Dalam sistem kategorisasi tanah berbasis tekstur, unsur utama tanah seperti lempung berpasir (*sandy clay*), lempung berlanau (*silty clay*), dan sebagainya digunakan untuk mengidentifikasi tanah.

Adapun ukuran dari tekstur tanah menurut Braja M. Das dalam buku Mekanika Tanah jilid pertama (1), adalah sebagai berikut:

1. Pasir merupakan butiran dengan ukuran diameter berkisar antara 2,0 hingga 0,05 mm.
2. Lanau merupakan butiran dengan ukuran diameter berkisar antara 0,05 hingga 0,002 mm.
3. Lempung merupakan butiran dengan ukuran diameter yang lebih kecil dari 0,002 mm.



Gambar 2.1 Klasifikasi Berdasarkan Tekstur Oleh USDA

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985)

c. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Pemakaian

1. Sistem Klasifikasi AASHTO

Awalnya dibuat pada tahun 1920 sebagai Sistem Klasifikasi Administrasi Jalan Umum, sistem klasifikasi tanah AASHTO awalnya membagi tanah menjadi tujuh kategori, dari A-1 hingga A-7. Setelah beberapa pembaruan, sistem ini diadopsi oleh *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) pada tahun 1945. Klasifikasi dapat dilihat pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5.

Tabel 2.4 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

| Klasifikasi umum | Tanah Berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200) | | | | | | |
|---|--|------------------|------------------|---|------------------|------------------|------------------|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | |
| Klasifikasi kelompok | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 |
| Analisis ayakan (% lolos) No. 10 No. 40 No. 200 | Max 50 Max 30 Max 15 | Max 50 Max 25 | Min 51 Max 10 | Max 35 | Max 35 | Max 35 | Max 35 |
| Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair (LL) Indeks plastisitas (PI) | Max 6 | | NP | Max 40 Max 10 | Min 41 Max 10 | Max 40 Min 11 | Min 41 Min 11 |
| Tipe material yang paling dominan | Batu pecah, kerikil, dan pasir | | Pasir halus | Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung | | | |
| Penilaian sebagai bahan tanah dasar | Baik sekali sampai baik | | | | | | |

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, 1985)

Tabel 2.5 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO (Lanjutan)

| Klasifikasi umum | Tanah lanau – lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200) | | | |
|---|--|------------------|------------------|--------------------------|
| | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5* A-7-6** |
| Analisis ayakan (% lolos) No. 10 No. 40 No. 200 | Min 36 | Min 36 | Min 36 | Min 36 |
| Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair (LL) Indeks plastisitas (PI) | Max 40 Max 10 | Max 41 Max 10 | Max 40 Min 11 | Min 41 Min 11 |

| | | |
|-------------------------------------|--|------------------|
| Klasifikasi umum | Tanah lanau – lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200) | |
| Tipe material yang paling dominan | Tanah berlanau | Tanah berlempung |
| Penilaian sebagai bahan tanah dasar | Biasa sampai jelek | |

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, 1985)

Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$ (*)

Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$ (**)

2. Sistem Klasifikasi *Unified*

Cassagrande pertama kali memperkenalkan sistem ini pada tahun 1942 untuk proyek galangan kapal oleh Korps Insinyur Angkatan Darat. Biro Reklamasi A.S. dan Korps Insinyur A.S. membuat sedikit modifikasi pada sistem tersebut pada tahun 1952. Pada tahun 1969, *American Society for Testing and Materials* (ASTM) telah mengadopsi sistem ini sebagai prosedur standar untuk klasifikasi tanah di bidang teknik. Sistem ini mengklasifikasikan tanah menjadi dua kategori utama yakni:

- a) Tanah yang berbutir kasar, seperti kerikil dan pasir, adalah jenis tanah dimana kurang dari 50% berat total sampel tanah dapat melewati ayakan No. 200. Kelompok ini ditandai dengan simbol awal G atau S. G (*gravel*) mengindikasikan kerikil atau tanah berkerikil, sedangkan S (*sand*) merujuk pada pasir atau tanah berpasir.
- b) Tanah berbutir halus menggambarkan jenis tanah yang dapat lolos saringan No. 200 dengan berat lebih dari setengah atau 50% berat sampel. Simbol pertama (M untuk lanau anorganik, C untuk tanah liat anorganik, dan O untuk lanau organik dan tanah liat organik) menunjukkan kategori ini. Untuk tanah gambut, kotoran, dan tanah dengan kandungan organik tinggi lainnya, gunakan tanda PT.

Simbol tambahan yang termasuk dalam kategorisasi tanah ini disusun sebagai berikut:

- a) W = *Well graded* (tanah dengan gradasi baik)
- b) P = *Poorly graded* (tanah dengan gradasi buruk)
- c) L = *Low plasticity* (plastisitas rendah) ($LL < 50$)
- d) H = *High plasticity* (plastisitas tinggi) ($LL > 50$)

Untuk pengelompokan kategorisasi lebih lanjut, dapat melihat Tabel 2.6 dibawah ini.

Tabel 2.6 Sistem Klasifikasi *Unified*

| Divisi Utama | | Simbol Kelompok | Nama Umum |
|---|--|--------------------------------|--|
| Tanah berbutir kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200** | Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4 | Kerikil bersih (hanya kerikil) | GW Kerikil bergradasi baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | | GP Kerikil bergradasi buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | Kerikil dengan butiran halus | GM Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau |
| | | | GC Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung |
| | Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No. 4 | Pasir bersih (hanya pasir) | SW Pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | | SP Pasir bergradasi buruk dan pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | Pasir dengan butiran halus | SM Pasir berlanau, campuran pasir-lanau |
| | | | SC Pasir berlempung, campuran pasir-lempung |

| Divisi Utama | | Simbol Kelompok | Nama Umum |
|---|---|-----------------|---|
| Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200 | Lanau dan Lempung, batas cair 50% atau kurang | ML | Lanau organik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung |
| | | CL | Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clay</i>) |
| | | OL | Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah |
| | Lanau dan Lempung, batas cair lebih dari 50% | MH | Lanau anorganik atau pasir halus diatomeae, atau lanau diatomeae, lanau yang elastis |
| | | CH | Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clay</i>) |
| | | OH | Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi |
| Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi | | PT | <i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi. |

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, 1985)

2.1.6 Parameter Tanah

a. Modulus Young

Traxial Test dapat digunakan untuk menentukan Modulus Young, suatu pengukuran elastisitas tanah yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan. Berdasarkan jenis tanah dan data sondir, nilai modulus elastisitas (E) dapat ditentukan secara empiris, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

| Macam Tanah | E (kN/m ²) |
|--------------------------|------------------------|
| LEMPUNG | |
| • Sangat Lunak | 300 – 3000 |
| • Lunak | 2000 – 40000 |
| • Sedang | 4500 – 9000 |
| • Keras | 7000 – 20000 |
| • Berpasir | 30000 – 42500 |
| PASIR | |
| • Berlanau | 5000 – 20000 |
| • Tidak Padat | 10000 – 25000 |
| • Padat | 50000 – 100000 |
| PASIR DAN KERIKIL | |
| • Padat | 80000 – 200000 |
| • Tidak Padat | 50000 – 140000 |
| LANAU | 2000 – 20000 |
| LOESS | 15000 – 60000 |
| CADAS | 140000 – 1400000 |

(Sumber: Mekanika Tanah 2, Hary Chistady Hardiyatmo, 1994)

b. *Poisson Ratio*

Poisson Ratio adalah perbandingan antara kompresi poros dan regangan permukaan lateral, yang bisa ditentukan berdasarkan jenis tanah, seperti yang tertera dalam Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Hubungan Antara Jenis Tanah dan *Poisson Ratio*

| Macam Tanah | Poisson Ratio (μ) |
|-------------------|-------------------------|
| Lempung jenuh | 0,40 – 0,50 |
| Lempung tak jenuh | 0,10 – 0,30 |

| Macam Tanah | Poisson Ratio (μ) |
|--|---|
| Lempung berpasir | 0,20 – 0,30 |
| Lanau | 0,30 – 0,35 |
| Pasir padat | 0,20 – 0,40 |
| Pasir kasar (angka pori, $e = 0,40 - 0,70$) | 0,15 |
| Pasir halus (angka pori, $e = 0,40 - 0,70$) | 0,25 |
| Batu | 0,10 – 0,40 |
| <i>Loess</i> | 0,10 – 0,30 |

(Sumber: Mekanika Tanah 2, 1994)

c. Sudut Geser Dalam (ϕ)

Sudut yang tercipta dalam tanah akibat interaksi antara tegangan normal dan tegangan geser dikenal sebagai sudut geser internal (ϕ). Tabel 2.9 memberikan penjelasan mengenai hubungan antara sudut gesek dalam dengan jenis tanah.

Tabel 2.9 Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

| Jenis Tanah | Sudut Geser Dalam (ϕ) |
|--------------------|--|
| Kerikil kepasiran | 35° – 40° |
| Kerikil kerakal | 35° – 40° |
| Pasir padat | 35° – 40° |
| Pasir lepas | 30° |
| Lempung kelanauan | 25° – 30° |
| Lempung | 20° – 25° |

(Sumber: Das, 1995)

d. Kohesi (c)

Gaya kohesif yang menyatukan partikel-partikel tanah disebut kohesi. Ukuran kekuatan geser tanah yang disebut kohesivitas menunjukkan seberapa tahan tanah terhadap deformasi lateral yang disebabkan oleh tegangan tanah.

Nilai kohesi didapatkan dari pengujian *Direct Shear Test* atau ditentukan dari data sondir (q_c) dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kohesi (c) (kg/cm}^2\text{)} = q_c \text{ (kg/cm}^2\text{)} / 20 \quad 2.1$$

e. Permeabilitas (k)

Permeabilitas tanah merujuk pada kemampuan tanah untuk memungkinkan air melewati rongga atau pori-porinya. Rentang nilai koefisien permeabilitas dapat ditemukan dalam Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Hubungan Antar Permeabilitas dengan Jenis Tanah

| Karakteristik | Nilai k (cm/detik) |
|---|---------------------|
| Kerikil sedang kasar | $> 10^{-1}$ |
| Kerikil halus-kasar | $10^{-1} - 10^{-3}$ |
| Pasir halus, pasir lanau | $10^{-3} - 10^{-5}$ |
| Lanau, lanau berlempung, lempung berlanau | $10^{-4} - 10^{-6}$ |
| Lempung gemuk | $< 10^{-7}$ |

(Sumber: Das, 1995)

f. Kadar Air Tanah

Kadar air tanah mengacu pada jumlah volume air yang ada dalam tanah, yang diukur sebagai perbandingan antara massa tanah dan berat air yang terkandung di dalamnya. Hubungan antara kadar air tanah dan jenis tanah dapat dilihat dalam Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Hubungan Antara Kadar Air dengan Jenis Tanah

| <i>Soil Texture</i> | <i>Saturated Water Content</i> | <i>Saturated Conductivity (cm/jam)</i> |
|------------------------|--------------------------------|--|
| <i>Sand</i> | 0,43 | 29,7 |
| <i>Loamy Sand</i> | 0,41 | 14,6 |
| <i>Sandy Loam</i> | 0,41 | 4,42 |
| <i>Loam</i> | 0,43 | 1,04 |
| <i>Silt</i> | 0,46 | 0,25 |
| <i>Silt Loam</i> | 0,45 | 0,45 |
| <i>Sady Clay Loam</i> | 0,39 | 1,31 |
| <i>Clay Loam</i> | 0,41 | 0,26 |
| <i>Silty Clay Loam</i> | 0,43 | 0,07 |
| <i>Sandy Clay</i> | 0,38 | 0,12 |
| <i>Silty Clay</i> | 0,36 | 0,02 |
| <i>Clay</i> | 0,38 | 0,02 |

(Sumber: Alves, Leij, & Genuchten, 1996)

2.1.7 Komposisi Tanah

a. Angka Pori

Menurut Lahnann (2014), jumlah ruang kosong, atau pori-pori tanah, dalam kaitannya dengan ruang padat ditunjukkan dengan rasio rongga. Setelahnya, air atau partikel kotoran yang lebih kecil akan mengisi pori-pori tersebut. Metrik ini, juga dikenal sebagai rasio rongga (e), merupakan hubungan volume tanah yang banyak digunakan dan didefinisikan sebagai rasio volume pori (V_v) terhadap volume butiran padat (V_s).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad 2.2$$

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985)

b. Porositas

Porositas, yang juga dikenal sebagai *porosity*, adalah rasio antara volume pori (V_v) dan total volume tanah (V). Angka ini mencerminkan proporsi dari volume pori yang dapat diukur dalam bentuk persentase (%).

$$n = \frac{V_v}{V} \text{ atau } e = \frac{n}{1 - n} \quad 2.3$$

(Sumber: *Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985*)

c. Kadar Air

Berat air (W_w) dibagi dengan berat partikel padat (W_s) dalam volume tanah yang diteliti disebut kadar air (w). Selain mengevaluasi jumlah pori tanah, porositas, tingkat kejenuhan, dan berat jenis, uji laboratorium dapat digunakan untuk menentukan jumlah air dalam tanah.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad 2.4$$

(Sumber: *Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985*)

Bobot tanah dalam satuan per volume disebut juga dengan berat volume atau *unit weight* (γ). Jadi,

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad 2.5$$

(Sumber: *Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985*)

d. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan (S), sering dinyatakan dalam persentase, dimana dalam pengertiannya yaitu rasio antara volume air (V_w) dan volume pori (V_v).

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad 2.6$$

(Sumber: *Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985*)

e. Berat Volume Basah

Berat volume basah, juga dikenal sebagai *moist unit weight* (γ_w), adalah nilai yang menunjukkan berat tanah basah per satuan volume.

$$\gamma_w = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

2.7

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985)

Dapat juga dinyatakan dalam berat butiran padat, kadar air, dan volume total yang dapat dihitung dengan rumus:

$$\gamma_w = \frac{W_s (1 + W)}{V} \quad 2.8$$

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985)

f. Berat Volume Kering

Berat volume kering, yang juga dikenal sebagai *dry unit weight* (γ_d), adalah rasio dari berat tanah kering per satuan volume tanah. Hasil ini diperoleh dari *soil test* dalam kondisi kering, dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad 2.9$$

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985)

Atau dapat berfungsi sebagai keterkaitan antara berat volume, berat volume kering, dan kadar air.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \quad 2.10$$

(Sumber: Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985)

2.1.8 Stabilitas Tanah

Menurut Dara & Rahmadani (2022), memperbaiki sifat fisik tanah merupakan proses mencapai stabilitas tanah. Dua cara paling umum untuk memperoleh stabilitas tanah adalah stabilitas mekanis dan stabilitas kimia. Stabilitas kimia meningkatkan kekebalan dan daya dukung tanah dengan menurunkan karakteristik teknisnya, sedangkan stabilitas mekanis meningkatkan daya dukung tanah dengan meningkatkan struktur dan kualitas mekanisnya. Namun, kurang menguntungkan jika menggabungkan bahan kimia dengan tanah.

2.1.9 Daya Dukung Tanah

Menurut Najoran (2020) dalam Dara & Rahmadani (2022), daya dukung tanah merujuk pada kemampuan tanah untuk menopang beban struktural tanpa mengalami kegagalan geser atau penurunan yang signifikan.

Menghitung daya dukung tanah penting dalam menetapkan kekuatan yang diperlukan untuk pondasi struktural. Ini diperlukan untuk memperkirakan

kemampuan tanah dalam menopang beban tertentu. Nilai maksimum didefinisikan oleh titik di mana kegagalan menjadi mungkin. Sebelum memilih jenis pondasi, perlu ditetapkan kekuatan yang diizinkan (q_a), yang dihitung dari hasil bagi antara kekuatan ultimit (Q_{ult}) dan faktor keamanan ($SF = 3$).

$$q_a = \frac{Q_{ult}}{FK} \quad 2.11$$

(Sumber: *Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das, 1985*)

Dengan:

q_a = Daya dukung izin (ton)

Q_{ult} = Daya dukung *ultimate* (t/m^2)

FK = *Safety Factor*

2.2 Tanah Longsor

2.2.1 Pengertian Tanah Longsor

Menurut Suryolelono (2002) dalam Hartono (2020), tanah longsor adalah pergeseran sejumlah besar tanah untuk mencapai keseimbangan baru setelah adanya gangguan dari luar yang mengurangi kekuatan geser tanah dan meningkatkan tegangannya. Secara umum, penurunan parameter kekuatan geser tanah dan peningkatan tegangan tanah merupakan penyebab terjadinya tanah longsor.



Gambar 2.2 Longsoran Pada Timbunan

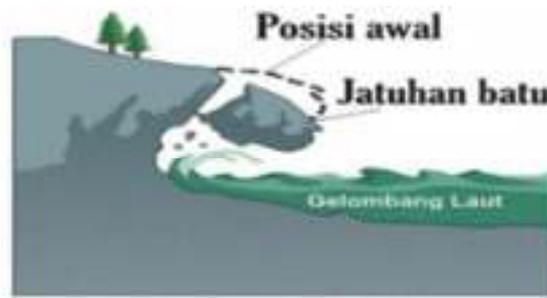
(Sumber: *Google, 2024*)

2.2.2 Klasifikasi Longsoran

Menurut Zakaria (2009) dalam Dharmawansyah. D (2010), adapun jenis-jenis klasifikasi longsoran yaitu sebagai berikut.

a. Jatuhan/*Fall*

Jatuhan, juga dikenal sebagai massa di udara yang terdiri dari batu-batu besar atau puing-puing yang jatuh bebas, melompat, dan berguling tanpa banyak interaksi satu sama lain.



Gambar 2.3 Jatuhan/*Fall*

(Sumber: Google, 2024)

b. Longsoran/*Slides*

Pergerakan ini diakibatkan dari kegagalan sepanjang satu atau lebih bidang yang bisa dilihat atau diprediksi.



Gambar 2.4 Longsoran/*Slides*

(Sumber: Google, 2024)

c. Aliran/*Flow*

Pergerakan terjadi pada material yang tidak terkonsolidasi dan dipengaruhi oleh tingkat kelembapan dalam tanah. Biasanya, bidang longsor yang memisahkan puing-puing yang bergerak tidak terlihat.



Gambar 2.5 Aliran/*Flow*

(Sumber: Google, 2024)

2.2.3 Faktor Penyebab Kelongsoran

Faktor terjadinya longsor menurut *Highway Research Board*, 1987 dalam Dharmawansyah. D (2010), yaitu:

- a. Kurangnya ketahanan tanah terhadap longsor yang diakibatkan:
 1. Erosi yang disebabkan oleh curah hujan, perubahan suhu yang kuat, atau pergerakan air sungai.
 2. Pergeseran lereng terjadi secara alami akibat pergeseran zona longsor atau penurunan (*settlement*) dan tingkat permeabilitas yang tinggi.
 3. Perilaku manusia, antara lain:
 - a) Pengikisan dasar lereng dari lereng gurun, yang dapat menyebabkan sudut lereng menjadi lebih lancip.
 - b) Kerusakan atau perpindahan struktur penahan tanah.
 - c) Ketinggian air di luar bendungan turun dengan cepat.
 - d) Rusaknya tanaman pada permukaan lereng.
- b. Peningkatan kekuatan dorong pada lereng akibat:
 1. Faktor alam, seperti:
 - a) Mengendapnya air hujan di tanah yang menjadi penyebab dari meningkatnya berat volume tanah.
 - b) Penumpukan sedimen di lereng bukit.
 2. Faktor manusia, seperti:
 - a) Penggalan tanah diatas lereng.
 - b) Aktivitas pembuatan gedung baru di sekitar lereng.
 3. Gempa atau sumber getaran benda lain.
 4. Bergeraknya material di sekitar lereng yang diakibatkan oleh:

- a) Ombak di laut atau sungai yang mengalir.
 - b) Terjadinya peristiwa piping.
 - c) Pengikisan dan penebangan yang dilakukan oleh manusia.
 - d) Berkurangnya kekuatan geser tanah di sekitar daerah lereng.
5. Timbulnya tekanan tanah arah lateral yang diakibatkan oleh:
- a) Retaknya struktur tanah pada lereng.
 - b) Bobot yang terdapat di permukaan lereng.
 - c) Mengerasnya tanah lempung.

2.2.4 Pekerjaan Penanggulangan Kelongsoran

Mengendalikan dan menahan tanah longsor adalah bagian dari upaya untuk mencegahnya. Dengan mengubah medan, ketinggian air di bawah permukaan, atau kondisi alam misalnya, dengan membangun tembok penahan tanah. Pekerjaan pengendalian bertujuan untuk menurunkan kemungkinan tanah longsor.

Sementara itu, struktur yang mampu menjaga kestabilan massa tanah/batuan melakukan tugas penahan. Contoh struktur ini adalah:

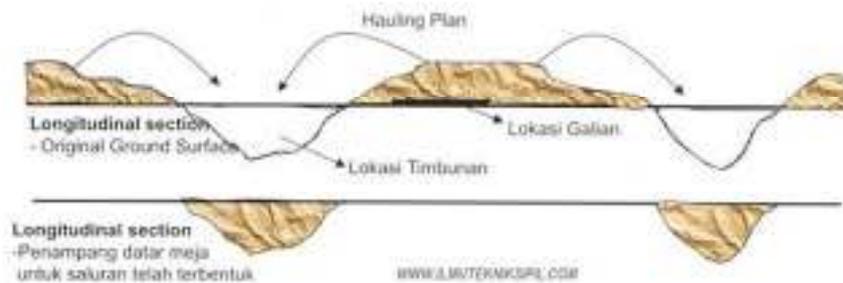
- a. Membuat dinding penahan (*retaining wall*), bronjong, tiang pancang (*sheet pile*), tiang pancang mikro (*minipile*), dan struktur lainnya untuk menjangkar tanah.
- b. Ikatan beton batu (*rock bolt*), jangkar kabel (*rock anchor*), beton semprot (*shotcrete*), dan penyangga beton merupakan beberapa alat yang digunakan untuk penahan batu.

2.3 Timbunan

2.3.1 Pengertian Timbunan

Timbunan merupakan tumpukan tanah yang biasanya digunakan untuk mengubah ketinggian bangunan lain seperti jalan, rel kereta api, gedung, dll, yang juga dapat menggantikan material tanah dasar (*subgrade*) yang ada jika tidak memenuhi kriteria (Sahara & Sipil, 2017). Contoh penimbunan di lereng bukit ditunjukkan pada Gambar 2.6. Penimbunan mengharuskan pemindahan bobot tanah dari lokasi lain untuk mengubah bentuk. Bentuk pengatur kontur biasanya berbentuk trapesium, dengan sisi atas diubah agar sesuai dengan lebar jalan di atasnya. Untuk menjaga stabilitas dan mencegah terjadinya longsor, kemiringan

timbunan juga dirancang dengan mempertimbangkan hal tersebut. Agar tidak terlalu curam, kemiringan sering kali dirancang dengan rasio lebih besar dari 1:1,5.



Gambar 2.6 Ilustrasi Penimbunan

(Sumber: Google, 2024)

Serangkaian prosedur yang digunakan selama pembangunan jalan atau bendungan untuk memperkuat dan menstabilkan timbunan dikenal sebagai perkuatan timbunan. Tujuan utamanya adalah untuk membuat struktur lebih aman dan kecil kemungkinannya untuk runtuh atau menyebabkan tanah longsor. Geotekstil, *geogrid*, dan dinding penahan adalah contoh material tambahan yang dapat digunakan dalam teknik perkuatan. Selain itu, timbunan dapat diperkuat dengan penggunaan material pasir dan batu, pemadatan tanah, pembangunan dinding penahan, dan cara lainnya. Untuk menjamin bahwa infrastruktur yang sedang dibangun memiliki ketahanan yang memadai terhadap beban dan tekanan yang dihadapi selama masa pakainya, penguatan merupakan langkah yang sangat penting.

2.3.2 Analisis Stabilitas Timbunan

Faktor keamanan ditetapkan dengan mempertimbangkan tegangan geser rata-rata di sepanjang bidang potensial kelongsoran dan kekuatan geser rata-rata tanah di sepanjang permukaan kelongsoran. Faktor keamanan (SF) adalah perbandingan antara gaya yang menahan dengan gaya yang menyebabkan pergerakan.

$$SF = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad 2.12$$

Keterangan:

τ_f = Tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah (kN/m^2)

τ_d = Tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor (kN/m^2)

Menurut teori *Mohr-Coulumb*, tahanan geser (τ) yang dapat dikerahkan oleh tanah, sepanjang bidang longsornya dinyatakan oleh:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad 2.13$$

Keterangan:

c = Kohesi (kN/m^2)

σ = Tegangan normal (kN/m^2)

φ = Sudut gesek dalam tanah ($^\circ$)

Dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsornya:

$$\tau_d = c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d \quad 2.14$$

Keterangan:

c_d = Kohesi (kN/m^2)

φ_d = Sudut gesek dalam yang bekerja sepanjang bidang longsor ($^\circ$)

Menurut penjelasan dalam buku Bowles J.E. (1989), informasi mengenai kondisi lereng berdasarkan faktor keamanan (SF) tersedia dalam Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Faktor Keamanan (SF) Lereng

| Faktor Keamanan | Status Lereng | Intensitas Longsor |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| $SF < 1,07$ | Lereng tidak stabil | Longsor sering terjadi |
| $1,07 \geq SF \geq 1,25$ | Lereng kritis | Longsor pernah terjadi |
| $SF \geq 1,25$ | Lereng stabil | Longsor jarang terjadi |

(Sumber: Bowles J.E, 1989)

Lereng yang tidak stabil adalah lereng yang cenderung mengalami longsor secara reguler, dengan nilai faktor keamanan (SF) di bawah 1,07. Lereng kritis merujuk pada lereng yang telah mengalami longsor sebelumnya, yang ditunjukkan oleh faktor keamanan (SF) berkisar antara 1,07 hingga 1,25. Sementara itu, lereng yang stabil merupakan lereng yang jarang mengalami longsor dan dianggap aman, dengan nilai faktor keamanan (SF) melebihi 1,25.

2.4 Penurunan (*Settlement*)

2.4.1 Umum

Masalah utama yang umum ditemukan pada tanah kohesif adalah penurunan permukaan tanah. Hal ini disebabkan dari beban di atasnya, menyebabkan tegangan pada lapisan tanah di bawahnya. Pemberian beban tersebut mengakibatkan pelepasan air pori dan pengurangan volume tanah, yang menyebabkan deformasi partikel pada tanah.

Dalam rekayasa geoteknik, tanah diklasifikasikan menjadi dua kategori utama yakni tanah granular (seperti pasir) dimana air pori dapat keluar dengan cepat karena permeabilitasnya yang tinggi, dan tanah kohesif (seperti tanah liat) dimana air pori mengalir secara perlahan karena permeabilitasnya rendah. Dalam bidang ilmu geoteknik, ada tiga jenis penurunan yang dikenal yakni:

2.4.2 Penurunan Seketika (*Immediate Settlement - Si*)

Penurunan seketika terjadi segera ketika suatu beban diterapkan, menyebabkan tanah di bawahnya mengalami peningkatan tegangan. Hal ini mengakibatkan kompresi vertikal tanah dan pergerakan lateral berikutnya, yang menurunkan elevasi tanah dasar (penurunan). Penyelesaian jenis ini bersifat elastis. Luasnya penurunan langsung sangat dipengaruhi oleh beban timbunan di atasnya dan modulus elastisitas tanah. Rumus penghitungan penyelesaian segera adalah sebagai berikut:

$$S_i = \frac{\Delta\sigma B}{E_s} \frac{1 - \mu_s}{P} I \quad 2.15$$

Dimana:

S_i = Penurunan segera (m)

$\Delta\sigma$ = Beban timbunan (kN/m^2)

B = Lebar atau diameter timbunan (m)

μ_s = Poisson Ratio

E_s = Modulus elastisitas tanah

I_p = *Non-dimensional influence factor*

Schleicher (1926) dalam Fahrizal et al (2022), mendefinisikan faktor I_p ini sebagai:

$$I_p = \frac{1}{\pi} \left[m_1 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln (m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1}) \right] \quad 2.16$$

Dimana:

$m_1 = L/B$ (panjang/lebar beban yang bekerja)

2.4.3 Penurunan Konsolidasi Primer (*Primary Consolidation - Sc*)

Penurunan konsolidasi mengacu pada perubahan permukaan tanah yang terjadi selama proses konsolidasi seiring dengan berkurangnya tekanan air pori. Durasi penurunan konsolidasi bervariasi berdasarkan karakteristik lapisan tanah. Biasanya, penyelesaian jenis ini terjadi pada tanah berbutir halus. Besarnya penyelesaian penurunan bisa ditentukan dengan memakai rumus:

a. Untuk tanah terkonsolidasi normal

$$Sc = H \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta \sigma'}{\sigma_0^F} \quad 2.17$$

b. Untuk tanah terkonsolidasi berlebih

Jika $\sigma_0' + \Delta \sigma' \leq \sigma_p'$, maka besarnya penurunan konsolidasi adalah:

$$Sc = H \frac{C_s}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta \sigma'}{\sigma_0^F} \quad 2.18$$

Sedangkan jika $\sigma_0' < \sigma_p'$ ($\sigma_0' + \Delta \sigma'$), besarnya penurunan konsolidasi adalah sebagai berikut:

$$Sc = H \frac{C_s}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_p^r}{\sigma_0^F} + H \frac{C_c}{1 + e_0} \quad 2.19$$

Dimana:

Sc = Penurunan konsolidasi primer (m)

H_0 = Tebal lapisan tanah (m)

C_c = Indeks kompresi

C_s = Indeks *swelling*

e_0 = Angka pori awal

σ_0' = Tegangan efektif awal (kN/m²)

σ_p' = Tegangan prakonsolidasi efektif awal (kN/m²)

$\Delta\sigma'$ = Perubahan efektif awal (kN/m²)

2.4.4 Penurunan Konsolidasi Sekunder (*Secondary Consolidation - Ss*)

Konsolidasi sekunder, atau penyelesaian mulur, terjadi setelah konsolidasi primer selesai. Proses ini melibatkan kompresi tanah lebih lanjut setelah terdispasinya air dan udara dari pori tanah. Kompresi tersebut terjadi akibat pergerakan butiran plastik di dalam tanah. Karena kelebihan tekanan air pori telah hilang dan tegangan efektif tetap tidak berubah pada saat ini, proses kompresi ini memakan waktu lama. Luasnya penyelesaian sekunder dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S_s = H_0 \frac{C_a}{1 + e_p} \log \frac{t_p + \Delta t}{t_p} \quad 2.20$$

Dimana:

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder (m)

H_0 = Tebal lapisan tanah (m)

C_a = Indeks kompresi penurunan sekunder

e_p = Angka pori pada akhir konsolidasi

t_p = Waktu ketika konsolidasi selesai (s)

Δt = Selang waktu terjadinya penurunan sekunder (s)

Setelah penurunan konsolidasi primer selesai, terjadi penurunan konsolidasi sekunder, yang terjadi ketika tekanan air pori berlebih menjadi nol ($u = 0$). Biasanya, untuk jenis tanah tertentu, hanya satu dari tiga jenis penurunan yang dominan karena jenis lainnya sering kali terlalu kecil untuk dipertimbangkan. Jadi, penurunan keseluruhan tanah yang dibebani adalah:

$$S = S_i + S_c + S_s \quad 2.21$$

Dengan:

S = Penurunan total (m)

S_i = Penurunan segera (m)

S_c = Penurunan konsolidasi primer (m)

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder (m)

Menurut Manual Pekerasan Jalan nomor 04/SE/Db/2017 Direktorat Jenderal Bina Marga, deformasi untuk timbunan di atas tanah lunak memiliki batas izin sebesar 100 mm atau 10 cm.

2.4.5 Waktu Konsolidasi Tanah

Menurut Terzaghi dalam Das (1985) menerangkan untuk lama waktu konsolidasi (t) dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$t = \frac{T_v (H_{dr})^2}{C_v} \quad 2.22$$

Dimana:

t = Waktu konsolidasi

T_v = Faktor waktu

C_v = Koefisien vertikal (cm^2/s atau m^2/s)

H_{dr} = Panjang aliran air *drainage* di dalam tanah (m)

Untuk parameter tanah dalam menghitung waktu konsolidasi terdiri dari:

a. Faktor Waktu

Faktor waktu (T_v) secara langsung bergantung pada derajat konsolidasi ($U\%$) dan pola tekanan air pori (u) dalam tanah, apakah alirannya satu arah atau dua arah. Bila distribusi tekanan air pori seragam, hubungan antara T_v dan U digambarkan pada Tabel 2.13 di bawah ini.

Tabel 2.13 Korelasi Antara T_v dan U

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| U (%) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| T_v | 0.008 | 0.031 | 0.071 | 0.126 | 0.197 | 0.287 | 0.403 | 0.567 | 0.848 | ∞ |

b. Koefisien Konsolidasi Vertikal (C_v)

Koefisien konsolidasi vertikal (C_v) dapat ditentukan dari grafik yang menunjukkan hubungan antara besar pemampatan tanah dan waktu (t).

c. Panjang Aliran *Drainage* H (H_{dr})

Biasanya, ketebalan lapisan lempung (yang merupakan tanah kompresibel) dinyatakan dengan H , dan panjang aliran drainase (H_{dr}).

$H_{dr} = \frac{1}{2} H$, ketika arah aliran air selama proses konsolidasi adalah dua arah (ke atas dan ke bawah).

$H_{dr} = H$, Jika arah aliran drainase searah (baik ke atas maupun ke bawah), hal ini terjadi bila terdapat lapisan kedap air di atas atau di bawah lapisan tanah liat (*impermeable*).

2.5 Perkuatan Timbunan

Penambahan kekuatan pada timbunan merupakan langkah untuk meningkatkan keamanannya secara relatif dan mencegah terjadinya kelongsoran. Dalam penelitian ini, alternatif perkuatan yang akan di evaluasi yaitu perkuatan *Minipile*, perkuatan Geotekstil, dan perkuatan *Slab On Pile*.

2.5.1 Perkuatan *Minipile*

Metode yang berguna untuk memperkuat tanah guna mencegah kegagalan jalan dan memastikan stabilitas timbunan adalah penggunaan tiang pancang vertikal yang berfungsi sebagai sistem relung. Sebagai alternatif, tiang pancang mini yang dibuat dari beton atau pipa baja dapat digunakan, dengan panjang yang dapat disesuaikan untuk mengakomodasi persyaratan bahwa panjang cerucuk harus melebihi kedalaman bidang penurunan. Menurut Rusdiansyah (2016) dalam Hartono (2020), menyatakan bahwa cerucuk berperan sebagai tiang pondasi yang bertujuan untuk memperkuat stabilitas lereng.

Pondasi *minipile* bisa diklasifikasikan berdasarkan jenis material yang digunakan, cara transfer beban tiang, dan teknik pemasangannya, di antaranya:

- a. Pondasi *Minipile* menurut pemakaian bahan dan karakteristik strukturnya

Minipile dapat dibagi kedalam beberapa kategori (Bowles, 1991) antara lain:

1. *Minipile* kayu
2. *Minipile* beton
3. *Minipile* baja
4. *Minipile* komposit

b. Pondasi *Minipile* menurut pemasangannya

Pondasi *minipile* menurut cara pemasangannya dibagi dua bagian besar, yaitu:

1. *Minipile* pracetak

Minipile pracetak adalah tiang mini yang diproduksi dengan mencetak dan menuangkan beton di dalam cetakan beton, lalu setelah mencapai kekuatan yang memadai, tiang tersebut diangkat dan dipancangkan. Menurut pemasangannya, *minipile* pracetak ini terdiri dari:

- a) Cara penumbukan
 - 1) Cara penggetaran
 - 2) Cara penanaman
- b) Tiang yang dicor di tempat (*cast in place pile*)

Tiang yang dicor di tempat (*cast in place pile*) ini menurut teknik penggaliannya terdiri dari beberapa macam cara yaitu:

- 1) Cara penetrasi alas
- 2) Cara penggalian

Pondasi *minipile* adalah struktur pondasi untuk bangunan yang mampu mengalirkan semua beban dari struktur tersebut ke dalam tanah sampai kedalaman tertentu, biasanya hingga mencapai lapisan tanah keras. Pondasi *minipile* ini digunakan untuk bangunan-bangunan dengan beberapa tingkat dan tanah yang cukup baik. Pada umumnya, panjang dari *minipile* adalah 3 sampai dengan 9 meter. Berikut adalah ukuran dan kekuatan yang tersedia:

1. Bentuk penampang persegi dengan ukuran 25 x 25 dan 20 x 20
 - a) Tiang pancang dengan penampang persegi berukuran 25 x 25 dapat menahan beban 40-50 ton.
 - b) Tiang pancang dengan penampang persegi berukuran 20 x 20 dapat menahan beban 30-35 ton.
2. Bentuk penampang segitiga dengan ukuran 28 dan 32
 - a) Tiang pancang dengan bentuk penampang segitiga dengan ukuran 28 dapat menahan beban 25-30 ton.
 - b) Tiang pancang dengan bentuk penampang segitiga dengan ukuran 32 dapat menahan beban 35-40 ton.

Adapun parameter-parameter yang digunakan dalam tahapan analisis perkuatan *minipile* adalah sebagai berikut:

$$A = b \times h \quad 2.23$$

Keterangan:

A = Luas Area (m^2)

b = Tebal *Minipile* (m)

h = Tinggi *Minipile* (m)

$$E = 4700 \times \sqrt{f_c} \quad 2.24$$

Keterangan:

E = Elastisitas Beton (Kpa)

f_c = Mutu Beton (Mpa)

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 \quad 2.25$$

Keterangan:

I = Momen Inersia Beton (m^4)

b = Tebal *Minipile* (m)

h = Tinggi *Minipile* (m)

$$EA = E \times A \quad 2.26$$

Keterangan:

EA = Kekakuan Normal (kN/m)

E = Elastisitas Beton (Kpa)

A = Luas Area (m^2)

$$EI = E \times I \quad 2.27$$

Keterangan:

EI = Kekakuan Lentur ($kN \ m^2/m$)

E = Elastisitas Beton (Kpa)

I = Momen Inersia Beton (m^4)

$$w = 24 \times \frac{A}{1} \quad 2.28$$

Keterangan:

w = Berat *Minipile* (kNm/m)

A = Luas Area (m²)

Seperti halnya pondasi tiang pancang lainnya, *minipile* tidak berfungsi sebagai tiang tunggal untuk menanggung beban, tetapi sebagai kelompok tiang yang terhubung oleh *pile cap*. Dimensi *pile cap* bervariasi tergantung pada jumlah tiang, jarak antar tiang, dan konfigurasi yang direncanakan.

Secara prinsip, *minipile* memiliki karakteristik yang serupa dengan tiang pancang beton konvensional. Oleh karena itu, kapasitas dukung *minipile* dapat diestimasi baik secara individual maupun sebagai bagian dari kelompok, dengan mempertimbangkan efisiensi kelompok tiang, susunan tiang, dan penurunan tanah yang terjadi. Perhitungan kapasitas dukung dapat dilakukan menggunakan rumus-rumus yang sama yang biasa digunakan untuk tiang pancang beton pracetak berukuran standar. Adapun rumus umum yang digunakan untuk memperkirakan daya dukung dengan data sondir yaitu:

$$Q_U = Q_P + Q_S - W_P \quad 2.29$$

$$W_P' = W_P - U \quad 2.30$$

$$W_P = A_P L \gamma_{\text{beton}} \quad 2.31$$

$$U = A_P ((L - H_W) \gamma_w) \quad 2.32$$

Dengan:

$$Q_P = A_P q_P \quad 2.33$$

Dan

$$Q_S = \sum f_S A_S \quad 2.34$$

Keterangan:

Q_U = Kapasitas dukung ultimit (kN)

Q_P = Tahanan ujung ultimit (kN)

Q_S = Tahanan gesek ultimit (kN)

q_P = Nilai tahanan ujung tiang persatuan luas penampang tiang (kN/m^2)

A_P = Luas penampang ujung tiang (m^2)

A_S = Luas penampang sisi tiang (m^2)

f_S = Tahanan gesek persatuan luas (kN/m^2)

W_P = Berat tiang (kN)

Dalam praktik analisis kapasitas dukung tiang, rumus tersebut langsung diadaptasi untuk mengestimasi kapasitas dukung tiang dengan menggunakan data sondir, sehingga direpresentasikan dalam persamaan 2.35 berikut ini.

$$Q_U = A_P q_C + (\sum f_S A_S) - W_P \quad 2.35$$

Keterangan:

q_C = Nilai tahanan ujung dari data sondir tepat pada posisi ujung tiang

f_S = Tahanan gesek per satuan luas (kN/m^2) (Tabel 2.14)

A_P = Luas penampang ujung tiang (m^2)

A_S = Luas penampang sisi tiang (m^2)

Tabel 2.14 Hubungan Tahanan Gesek Tiang dengan q_C

| <i>Pile Type</i> | <i>Ultimate Unit Shaft Friction</i> |
|--|-------------------------------------|
| <i>Timber</i> | 0,012 q_C |
| <i>Precast concrete</i> | 0,012 q_C |
| <i>Precast concrete enlarged base</i> | 0,018 q_C |
| <i>Steel displacement</i> | 0,012 q_C |
| <i>Open-ended steel rube</i> | 0,008 q_C |
| <i>Open-ended steel tube driven into fine to medium sand</i> | 0,0033 |

(Sumber: Tomlinson & Woodward, 2008)

2.5.2 Perkuatan Geotekstil

Geotekstil adalah bahan lembaran terbuat dari bahan tekstil polimer yang *permeable*, tersedia dalam bentuk *non-woven*, dan anyaman (*woven*), yang digunakan dalam kontak dengan tanah/batu serta bahan geoteknik lainnya dalam berbagai aplikasi teknik sipil (Zerisa, 2022). Umumnya, geotekstil rentan terhadap kerusakan atau degradasi akibat paparan sinar ultraviolet dari matahari. Dengan variasi material dan metode produksi yang berbeda, penting untuk memilih jenis geotekstil yang sesuai untuk proyek di lapangan.

Dari segi fungsionalitas, beberapa aplikasi geotekstil yang selama ini dimanfaatkan adalah:

- a. Geotekstil berfungsi sebagai pemisah antara berbagai material. Dalam sistem perkerasan jalan dan landasan pacu bandara, posisi tersebut ditempatkan di antara tanah dasar dan dasar agregat, serta antara lapisan aspal lama dan baru (dalam lapisan luar). Untuk timbunan, geotekstil diletakkan di dasar timbunan pada tanah lunak untuk memisahkan material dan meningkatkan stabilitas timbunan.
- b. Sebagai penyaring. Dalam konteks penggunaannya sebagai penyaring, geotekstil sering kali dipasang mengelilingi agregat batuan atau pipa pengumpul dalam saluran drainase bawah tanah. Jika geotekstil ditempatkan di dalam timbunan, dapat bertindak sebagai penyaring untuk mencegah butiran halus terbawa oleh aliran rembesan.



Gambar 2.7 Geotekstil *Non-Woven*

(Sumber: Google, 2024)



Gambar 2.8 Geotekstil *Woven*

(Sumber: Google, 2024)

Peran penguatan dalam geotekstil bisa dianggap sebagai analogi dengan tulangan pada beton bertulang. Dalam konteks yang sama, tanah memiliki kemampuan untuk menahan tekanan tetapi tidak dapat menahan tarikan. Kelemahan ini dapat diatasi oleh geotekstil, yang dapat ditempatkan di bawah timbunan yang dibangun di atas tanah lunak atau digunakan untuk konstruksi penahan tanah. Tabel 2.15 mencantumkan karakteristik mekanik yang dimiliki oleh geotekstil.

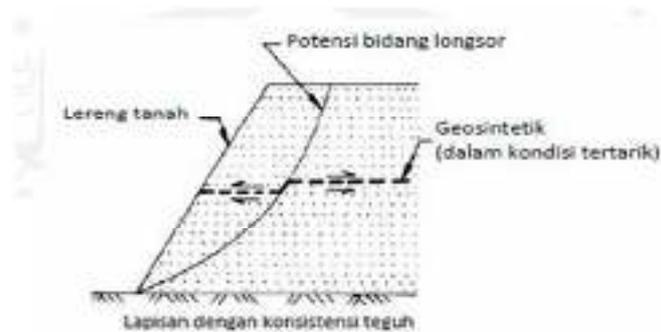
Tabel 2.15 Sifat Mekanik Geotekstil

| Jenis Geotekstil | Struktur | Tebal (mm) | Berat perluas (gr/m ²) | Kuat tarik (kN/m) | Perpanjangan (%) |
|------------------|----------|------------|------------------------------------|-------------------|------------------|
| Polyfet IS50 | Niranyam | 1,90 | 200 | 15 | 35 |
| Polyfet IS70 | Niranyam | 2,50 | 285 | 21,5 | 40 |
| Polyfet IS80 | Teranyam | 2,90 | 325 | 24 | 40 |
| Hate Renfox T | Teranyam | NA | 250 | 40 | 21 |
| Hate Renfox R | Teranyam | NA | 325 | 60 | 44 |

(Sumber: PT. Tetrasa Geosinido, 2024)

Dalam teknik sipil, salah satu peran utama geotekstil adalah stabilisasi tanah, yang meningkatkan sifat mekanik tanah, meningkatkan faktor keamanan lereng, dan menstabilkan lereng curam (kurang dari 70°). Lereng tanah yang diperkuat biasanya terdiri dari material timbunan yang dipadatkan dan diperkuat dengan lapisan geotekstil horizontal. Jika digabungkan, tanah dan geotekstil membentuk

material komposit dengan kekuatan tekan dan tarik yang tinggi, sehingga mampu menahan gaya dan deformasi. Pada tahap ini, geotekstil berfungsi sebagai elemen pengikat, pengunci, atau pengekang, menyatu dengan tanah atau timbunan untuk menjaga kestabilan massa tanah, seperti terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Dasar Mekanisme Perkuatan Lereng dengan Tanah

(Sumber: Google, 2024)

Saat mendesain dengan geotekstil, penting untuk memperhitungkan kekuatan tarik material untuk memastikan material tersebut dapat menahan gaya geser saat terjadi tanah longsor. Untuk menentukan kekuatan material geotekstil digunakan persamaan sebagai berikut:

$$T_{ijin} = T_{ult} \left(\frac{1}{FS_{ID} + FS_{CR} + FS_{CD} + FS_{BD}} \right) \quad 2.36$$

Dimana:

T_{ijin} = Tegangan tarik ijin geotekstil

FS_{ID} = Angka keamanan akibat kerusakan saat instalasi

FS_{CR} = Angka keamanan karena rayapan

FS_{CD} = Angka keamanan akibat degradasi kimia

FS_{BD} = Angka keamanan akibat degradasi biologi

Tabel 2.16 Angka Keamanan Parsial Yang Direkomendasikan

| Area Penerapan | Beberapa Angka Keamanan Parsial | | | |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| | Instalasi (FS _{ID}) | Rayapan (FS _{CR}) | Degradasi Kimia (FS _{CD}) | Degradasi Biologi (FS _{BD}) |
| Pemisah | 1,1 - 2,5 | 1,5 - 2,5 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,2 |
| <i>Cushioning</i> | 1,1 - 2,0 | 1,2 - 1,5 | 1,1 - 2,0 | 1,0 - 1,2 |
| Jalan Tanpa Perkerasan | 1,1 - 2,0 | 1,5 - 2,5 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,2 |
| Dinding | 1,1 - 2,0 | 2,5 - 4,0 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,3 |
| Timbunan | 1,1 - 2,0 | 2,0 - 3,5 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,3 |
| Daya Dukung | 1,1 - 2,0 | 2,0 - 4,0 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,3 |
| Stabilitas Lereng | 1,1 - 1,5 | 2,0 - 3,0 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,3 |
| <i>Overlay</i> | 1,1 - 1,5 | 1,0 - 2,0 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,1 |
| Jalan Rel | 1,1 - 3,0 | 1,0 - 1,5 | 1,5 - 2,0 | 1,0 - 1,2 |
| Form Fleksibilitas | 1,1 - 1,5 | 1,5 - 3,0 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,1 |
| Dinding Lanau | 1,1 - 1,5 | 1,5 - 2,5 | 1,0 - 1,5 | 1,0 - 1,1 |

(Sumber: Hatmoko, 2020)

Kontrol stabilitas timbunan yang diperkuat dengan bahan geotekstil terdiri dari stabilitas internal dan stabilitas eksternal.

a. Stabilitas Internal

Gaya-gaya yang diperlukan adalah:

1. Tanah yang berada dibelakang timbunan
2. Beban luar, termasuk beban tambahan dan beban hidup

Besarnya tegangan horizontal yang diterima dinding (σ_H) adalah:

$$\sigma_H = \sigma_{HS} + \sigma_{Hq} + \sigma_{HL} \quad 2.37$$

Keterangan:

- σ_H = Tegangan horizontal yang diterima dinding
- σ_{HS} = Tegangan horizontal akibat tanah dibelakang dinding
- σ_{Hq} = Tegangan horizontal akibat tanah timbunan
- σ_{HL} = Tegangan horizontal akibat beban hidup

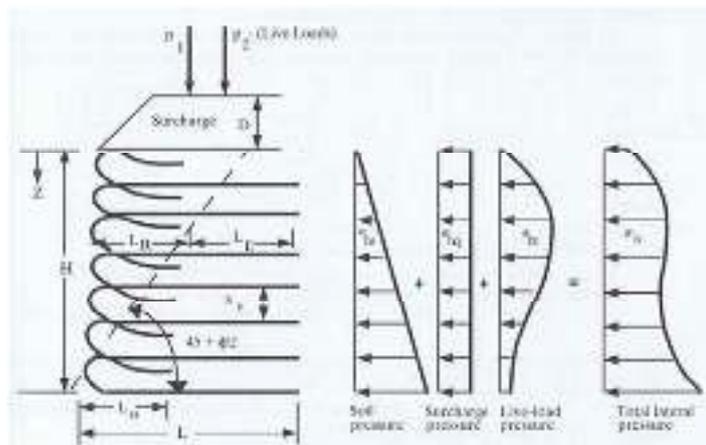
Distribusi tegangan horizontal yang disebabkan oleh beban hidup, dilambangkan dengan σ_{HL} , dapat ditentukan dengan mengacu pada kurva pada diagram tekanan tanah lateral yang memperhitungkan beban permukaan termasuk beban garis dan beban terpusat. Jarak vertikal pada pemasangan geotekstil (S_V) yang digambarkan pada Gambar 2.10 yakni:

$$\sigma_{HZ} S_V = \frac{T_{ijin}}{FS} \quad 2.38$$

$$S_V = \frac{T_{ijin}}{FS \times \sigma_h} \quad 2.39$$

Dimana:

- σ_{HZ} = Tegangan horizontal pada kedalaman z
- T_{ALL} = Kekuatan geotekstil yang tersedia
- FS = Faktor keamanan yang direncanakan



Gambar 2.10 Konsep Tekanan Tanah dan Teori Untuk Dinding Geotekstil

(Sumber: Koerner, 1999)

Panjang geotekstil yang ditanam (L) dapat diselesaikan dengan persamaan:

$$L = L_e + L_R \quad 2.40$$

Dimana:

$$L_R = (H - Z) \times \left[\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\delta}{2} \right) \right] \quad 2.41$$

Dan

$$S_V \sigma_h FS = 2\tau L_e \text{ dengan } \tau = c + \sigma_v \tan \delta$$

$$= 2 (c + \sigma_v \tan \delta) L_e$$

$$= 2 (c + \gamma \cdot z \tan \delta) L_e$$

Sehingga

$$L_e = \frac{S_V \times \sigma_H FS}{2 (C + \sigma_v \tan \delta)} \quad 2.42$$

Keterangan:

L_e = Panjang geotekstil yang berada dalam anchorage zone (minimum 3 ft atau 1 m)

L_R = Panjang geotekstil yang berada didepan bidang longsor

τ = Kekuatan geser tanah terhadap geotekstil

c = Kohesi tanah ($c = 0$ apabila tanah pasir)

δ = Sudut geser antara tanah dan geotekstil

σ_H = Tegangan horizontal

σ_v = Tegangan vertikal ($\sigma_v = \gamma \cdot z$)

FS = Faktor keamanan (1,3 s/d 1,5)

Panjang lipatan (L_o) dimana gaya yang diperhitungkan $\frac{1}{2} \sigma_H$

$$L_o = \frac{S_V \times \sigma_H FS}{4 (C + \sigma_v \tan \delta)} \quad 2.43$$

Keterangan:

c = Kohesi tanah ($c = 0$ apabila tanah pasir)

δ = Sudut geser antara tanah dan geotekstil

σ_H = Tegangan horizontal

σ_v = Tegangan vertikal ($\sigma_v = \gamma \cdot z$)

FS = Faktor keamanan (1,3 s/d 1,5)

b. Stabilitas Eksternal

Perencanaan kekuatan lereng menggunakan geotekstil juga harus diperhatikan kontrol terhadap *Eksternal Stability* di antaranya adalah:

1. Stabilitas terhadap guling

Stabilitas timbunan terhadap guling dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$FS_{OT} = \sum \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Penggerak}} \quad 2.44$$

$$= \frac{W_i x_i + P_a \sin \delta (L)}{P_a \cos \delta (H/3)} \quad 2.45$$

Keterangan:

FS_{OT} = Angka keamanan timbunan terhadap guling

W_i = Berat dinding tanah

x_i = Jarak ke titik berat

P_a = Tekanan tanah aktif

δ = Sudut geser antara tanah dan geotekstil

L = Panjang geotekstil

2. Stabilitas terhadap geser

Keamanan lereng terhadap geser dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$FS_S = \sum \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Penggerak}} \quad 2.46$$

$$= \frac{[C + (\frac{W_i + P_a \sin \delta}{L}) \tan \delta] L}{P_a \cos \delta} \quad 2.47$$

Keterangan:

FS_S = Angka keamanan timbunan terhadap geser

W_i = Berat dinding tanah

x_i = Jarak ke titik berat

- P_a = Tekanan tanah aktif
 δ = Sudut geser antara tanah dan geotekstil
 L = Panjang geotekstil

3. Stabilitas terhadap daya dukung

Kemampuan tanah dalam mendukung beban dapat di cek dengan persamaan:

$$FS_{BC} = \frac{q_{ult}}{\sigma_{max}} \quad 2.48$$

Nilai q_{ult} ditentukan berdasarkan teori daya dukung pondasi dangkal, sedangkan P_{act} mewakili tegangan yang disebabkan oleh beban eksternal, termasuk berat tanah timbunan dan beban lain yang diterapkan pada timbunan.

2.5.3 Perkuatan *Slab On Pile*

Slab On Pile merupakan struktur alternatif beton bertulang yang beban utamanya didistribusikan melalui pelat yang ditopang oleh tiang pancang yang berfungsi sebagai kolom dan pondasi (Farichah, 2015). Konsep ini telah sering digunakan, di mana *slab* dalam struktur ini berfungsi untuk menanggung beban eksternal seperti kendaraan, dan seterusnya dialirkan ke tiang pancang. Kedalaman tiang pancang adalah hal yang harus direncanakan. Tiang pancang dapat direncanakan untuk mencapai kedalaman tanah keras.

a. Pembebanan Bangunan Atas

Saat merancang pelat beton, penting untuk mempertimbangkan beban yang akan dialami struktur. Beban-beban ini akan mempengaruhi dimensi pelat beton dan jumlah tulangan yang dibutuhkan. Untuk perencanaan mengacu pada RSNI T02-2005 dan SNI 03 2833-2008. Berbagai tindakan pemuatan dikategorikan berdasarkan sumbernya.

1. Beban Tetap

- a) Berat sendiri (MS), meliputi elemen struktural dan elemen non-struktural yang dipikul dan bersifat tetap.
- b) Beban mati tambahan (MA), meliputi beban tambahan seperti lapisan perkerasan dan genangan air hujan.

2. Beban Lalu Lintas

a) Beban Truk (Tt), meliputi:

- 1) Beban lajur terbagi rata (BTR), menurut RSNI T02-2005 adalah sebagai berikut:

$$L \leq 30 \text{ m} : q = 9 \text{ kPa} \quad 2.49$$

$$L > 30 \text{ m} : q = 9 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad 2.50$$

Dimana:

q = Intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang *slab* beton

L = Panjang total *slab* beton yang dibebani (m)

2) Beban Lajur Garis (BGT)

Beban yang diperhitungkan adalah sebesar 49,0 kN dan harus dikalikan dengan faktor kejut (FBD).

3. Beban Lingkungan

a) Beban Angin (T_{EW})

$$T_{EW} = 0,0006 C_W (V_W)^2 A_b \text{ (kN)} \quad 2.51$$

Dimana:

V_W = Kecepatan angin rencana (m/s) untuk keadaan batas yang ditinjau

C_W = Koefisien seret

A_b = Luas koefisien bagian samping *slab* beton (m²)

Jika terdapat beban garis tambahan arah horizontal maka:

$$T_{EW} = 0,0012 C_W (V_W)^2 A_b \text{ (kN)} \quad 2.52$$

Dimana:

$$C_W = 1.2$$

b) Beban Gempa (T_{EQ})

Beban rencana gempa minimum diperoleh dari rumus:

$$T_{EQ} = K_h \times I \times W_T \quad 2.53$$

Dimana:

$$K_h = C \times S$$

T_{EQ} = Gaya geser dasar total dalam arah yang ditinjau (ton)

K_h = Koefisien beban gempa horizontal

I = Faktor kepentingan

W_T = Berat total nominal bangunan (ton)

C = Koefisien geser dasar

S = Faktor tipe bangunan

Pada perhitungan ini juga akan dihitung elastisitas dari struktur seperti di bawah ini.

$$C_{elastis} = \frac{1.2 \times A \times S}{T^{2/3}} \leq 2.5 \times A \quad 2.54$$

Dimana:

A = Akselerasi puncak di batuan dasar (g)

S = Koefisien tanah

T = Periode Alami Struktur (detik)

Periode alami struktur dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{P_o \times g \times \alpha}} \quad 2.55$$

Dimana:

T = Periode alami struktur (detik)

P_o = Satuan gaya seragam virtual (1 kN/m)

g = Gaya gravitasi (9.8 m/det²)

α, γ = Perumusan ekspresi akibat satuan gaya virtual (m²)

α = $\int V_S(x)dx$ (m²)

β = $\int W_T(x) V_S(x)dx$ (t.m)

γ = $\int W_T(x) V_S(x)^2 dx$ (t.m)

Dimana:

$V_S(x)$ = Profil simpangan akibat P_o (= $(P_o \times L) / (n \times k)$)

P_o = Satuan gaya seragam virtual (1 kN/m)

$W(x)$ = Distribusi berat mati sistem per satuan panjang (kN/m)

b. Penulangan Pada *Slab On Piles* dan Balok Poer

Perhitungan penulangan pada *slab on piles* dan balok poer menggunakan rumus yang sama pada penulangan struktur beton bertulang seperti berikut:

$$\rho_b = \left(\frac{0.85 \times \beta \times f_c}{f_y} \right) \times \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad 2.56$$

Dengan nilai $\beta = 0.85$ untuk $f_c = 30$ Mpa atau ≤ 30 Mpa, dan apabila nilai $f_c > 30$ Mpa maka akan direduksi sebesar 0.05 setiap peningkatan sebesar 7 Mpa.

$$\rho_{maks} = 0.75 \times \rho_b \quad 2.57$$

$$\rho_{min} = \frac{1/4}{f_y} \quad 2.58$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \times \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \times m \times R_n}{f_y} \right)} \right\} \quad 2.59$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 \times f_c} \quad 2.60$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \times d^2} \quad 2.61$$

$$A_s = \rho_{perlu} \times b \times d \quad 2.62$$

$$n = \frac{A_s}{\text{diameter tulangan}} \quad 2.63$$

2.6 Load Transfer Platform (LTP)

LTP yang tercakup dalam hal ini yaitu terdiri dari pilihan pengisi struktural granular baik yang diperkuat ataupun tanpa diperkuat dengan satu atau lebih lapisan geosintetik.

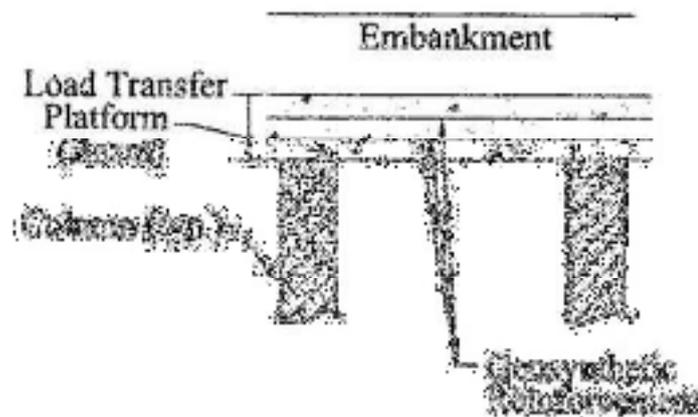
2.6.1 Material Granular

Jika ada lapisan tanah di bawah permukaan tanah yang cukup kaku dan memiliki kedalaman yang memadai. Lapisan ini bisa berguna sebagai LTP. Jika di tanah lokasi proyek pada permukaan tanahnya tidak memiliki sifat yang cukup memadai untuk bertindak sebagai LTP maka pengurukan bahan diperlukan untuk menciptakan LTP. Yang melengkung di tanah LTP di atas kolom dianggap sebagai komponen yang perlu untuk melengkapi dalam *transfer stress* dari timbunan ke

kolom. Oleh karena itu, penting bahwa tanah di zona lengkungan akan dibentuk menjadi bahan gesekan dengan kekuatan geser yang tinggi. Oleh karena itu material granular yang mengisi dianggap sebagai bahan yang ideal untuk membangun LTP. Di atas *platform*, bahan pengisi lain dapat digunakan untuk membangun sisa timbunan.

2.6.2 Penguatan Geosintetik

Bahan penguat geosintetik digunakan untuk membuat LTP yang salah satunya lapisan geotekstil kekuatan tinggi atau *Geogrid*, atau beberapa lapisan kekuatan tanah yang lebih rendah yaitu *Geogrid Biaksial*. Jenis dan kekuatan penguatan geosintetik adalah fungsi dari model desain yang digunakan untuk analisis LTP (yaitu *catenary* atau balok), jarak antar kolom, dan tinggi timbunan. Banyak perancang yang mengharuskan mengisi lapisan bantalan ditempatkan di antara bagian atas kolom dan penguatan geosintetik atau *non woven*, jarum akan menekan geotekstil yang ditempatkan di antara bagian atas tumpukan *Geogrid*. Fungsi utama dari lapisan bantal/dasar ini adalah untuk menghilangkan abrasi dan mengurangi konsentrasi tegangan yang jika tidak akan terjadi antara bagian atas kolom dan penguatan. Selain itu, *cap* tumpukan seharusnya bulat, dan tidak tajam di tepi.



Gambar 2.11 Mekanisme Penggunaan LTP

(Sumber: Google, 2024)

2.7 Pembebanan

2.7.1 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam analisis stabilitas geoteknik, terutama pada struktur tanah dan lereng yang

berdekatan dengan jalan raya. Tekanan yang ditimbulkan oleh kendaraan berat dapat meningkatkan tegangan pada lapisan tanah, yang berpotensi memicu penurunan stabilitas dan memperbesar risiko longsor atau keruntuhan struktur. Oleh karena itu, memahami distribusi dan intensitas beban lalu lintas menjadi sangat penting dalam perencanaan geoteknik yang efektif.

Dalam perancangan struktur geoteknik, seperti tembok penahan tanah atau pondasi jalan, beban lalu lintas harus dimodelkan secara akurat untuk memastikan bahwa sistem penyangga mampu menahan beban tambahan tersebut. Kegagalan dalam mempertimbangkan beban lalu lintas dengan tepat dapat menyebabkan deformasi pada struktur tanah, yang pada akhirnya bisa mengakibatkan kegagalan konstruksi dan membahayakan keselamatan pengguna jalan. Perhitungan ini melibatkan analisis interaksi antara beban dinamis dari kendaraan dan karakteristik mekanik tanah.

Selain itu, manajemen beban lalu lintas juga diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif pada stabilitas geoteknik. Misalnya, pembatasan berat kendaraan yang melewati area tertentu dapat diterapkan untuk mengurangi tegangan pada tanah dan mencegah terjadinya penurunan stabilitas. Pemantauan dan pemeliharaan yang berkelanjutan juga penting untuk memastikan bahwa struktur geoteknik tetap stabil di bawah beban lalu lintas yang terus berubah.

Adapun ketentuan untuk beban lalu lintas menurut SNI 8460 tahun 2017 adalah sebagai berikut:

Tabel 2.17 Beban Lalu Lintas Untuk Analisa Stabilitas

| Kelas Jalan | Beban Lalu Lintas (kPa) |
|--------------------|--------------------------------|
| I | 15 |
| II | 12 |
| III | 12 |

(Sumber: SNI 8460 - 2017)

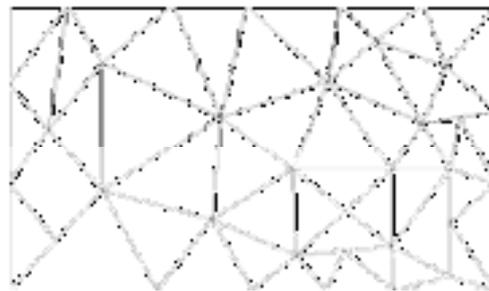
2.8 Metode Elemen Hingga (FEM)

Metode elemen hingga merupakan pendekatan numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan diferensial, termasuk persamaan diferensial biasa

(ODE) dan seringkali digunakan sebagai model dalam rekayasa. Inti dari metode ini adalah memecah permasalahan kompleks menjadi elemen-elemen kecil, di mana solusi yang lebih sederhana dapat diperoleh. Ketika solusi dari setiap elemen digabungkan, maka akan membentuk solusi dari permasalahan secara keseluruhan. Adapun perhitungan dalam metode ini yaitu:

a. Diskritisasi

Diskritisasi melibatkan pemecahan domain global menjadi beberapa elemen lokal yang lebih kecil, yang dikenal sebagai elemen hingga. Dalam analisis mekanika tanah, proses ini memerlukan pembagian elemen global yang besar menjadi beberapa segitiga kecil, sehingga membentuk jalinan elemen. Titik pertemuan sisi-sisi elemen tersebut disebut *node*, sedangkan garis antar elemen disebut garis *node*. Keakuratan metode elemen hingga meningkat dengan bertambahnya jumlah elemen segitiga karena elemen yang lebih kecil memungkinkan representasi yang lebih rinci dari fenomena yang diamati.



Gambar 2.12 Diskritisasi Elemen

(Sumber: Google, 2024)

b. Pemilihan Fungsi Aproximasi

Tahapan ini digunakan untuk menentukan *displacement* setiap elemen menggunakan polynomial berderajat n . Semakin tinggi nilai n , semakin tinggi pula ketelitiannya. *Displacement* suatu *node* dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\{u\} = [N] \{q\} \tag{2.64}$$

Dimana:

$[N]$ = Matriks fungsi interpolasi

$$\{q\} = \{u_1, u_2, \dots, v_1, v_2, \dots\}^T$$

- c. Menentukan Hubungan Regangan-Perpindahan dan Tegangan-Regangan
- d. Penurunan Persamaan Elemen

Penurunan persamaan dilakukan dengan menggunakan metode *variational* atau *residual* (misal metode Galerkin). Persamaan elemen dapat ditulis sebagai berikut:

$$[k] \{q\} = \{Q\} \quad 2.65$$

Dimana:

$[k]$ = Matriks properti elemen

$\{Q\}$ = Vektor gaya node

- e. *Assembling* Properti Elemen ke Persamaan Global

Persamaan unsur-unsur dikonsolidasikan sehingga membentuk hubungan kekakuan yang berlaku untuk semua unsur. Proses ini memastikan bahwa kompatibilitas perpindahan pada setiap *node* tercapai. Hubungan kekakuan dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$[K] \{r\} = \{R\} \quad 2.66$$

Dimana:

$[K]$ = *Global Stiffness* Matriks

$\{r\}$ = *Global nodal displacement vector*

$\{R\}$ = *Global nodal forcet vector*

- f. Menghitung Besaran-Besaran Primer Yang Tidak Diketahui
- g. Menghitung Besaran-Besaran Sekunder
- h. Interpretasi

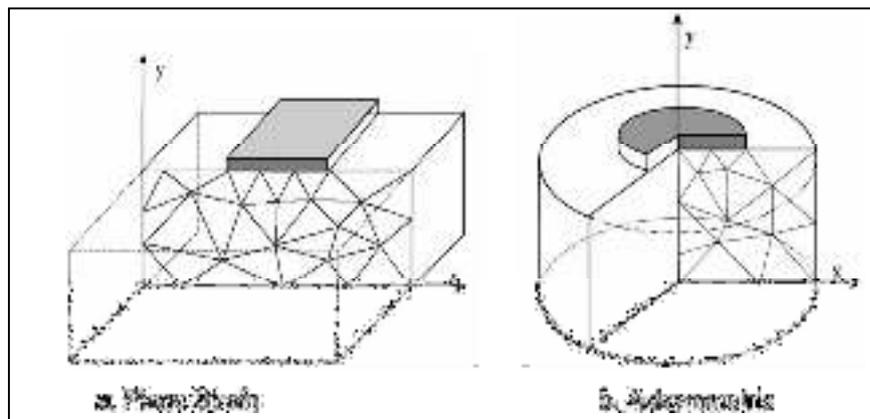
Jika ditinjau dari geometri, pemodelan metode *Finite Element* menggunakan salah satu dari dua (2) kondisi berikut, yaitu:

- a. *Plane Strain*

Kondisi ini berlaku bila struktur dipandang mempunyai panjang tak hingga yang tegak lurus terhadap penampang. Pada kondisi ini, $\epsilon_z = 0$ dan $u_z = 0$. Contoh struktur yang sesuai dengan kondisi ini antara lain pondasi menerus, timbunan, dan *cofferdam*.

b. *Axisymmetric*

Kondisi ini berlaku pada struktur berbentuk lingkaran, dimana beban didistribusikan di sekitar sumbu lingkaran, dan tegangan serta deformasi seragam pada semua arah radial. Dalam pengaturan ini, sumbu x mewakili arah radial, sedangkan sumbu y menunjukkan simetri lipat aksial, dengan sumbu x negatif tidak relevan. Pondasi pelat melingkar adalah contoh struktur tersebut. Regangan bidang dan kondisi aksisimetri diilustrasikan pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Kondisi *Plane Strain* dan *Axisymmetric*

(Sumber: Google, 2024)

2.9 Plaxis

Plaxis adalah sebuah perangkat lunak komputer yang didasarkan pada metode *finite element 2D*. Program ini dirancang untuk memperhitungkan besar deformasi dan stabilitas dalam berbagai aplikasi di bidang geoteknik, termasuk estimasi kapasitas dukung tanah (Adi, 2014). *Mohr-Coulomb* akan digunakan sebagai pemodelan dalam aplikasi Plaxis. Apabila data tanah yang memadai tidak dapat dikumpulkan, model *Mohr-Coulomb* disarankan untuk dipakai dalam penyelidikan awal permasalahan yang ada karena relatif sederhana dan cepat. Adapun parameter-parameter yang digunakan dalam model *Mohr-Coulomb* adalah sebagai berikut:

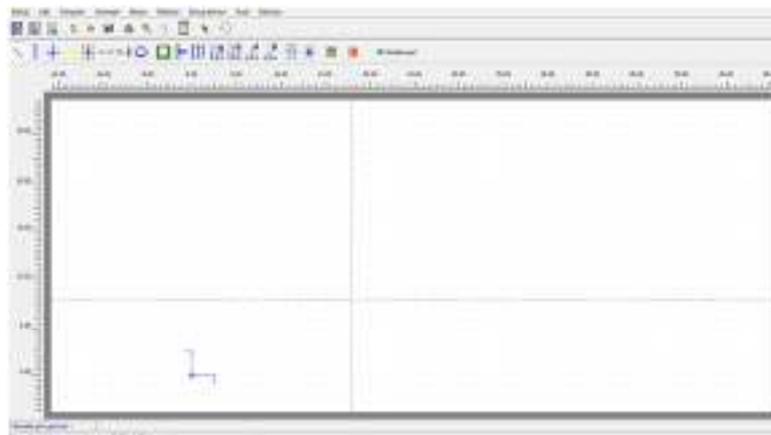
- Poisson Ratio* (ν)
- Sudut geser dalam (ϕ)
- Modulus Young (E)
- Kohesi (c)

- e. Berat isi tanah jenuh air (γ_{sat})
- f. Berat isi tanah alami (γ_{unsat})
- g. Permeabilitas (k)

2.9.1 Analisis Stabilitas Timbunan Menggunakan Plaxis

Program Plaxis menggunakan model *finite element* untuk menentukan deformasi selama konstruksi timbunan pada tanah lunak. Terdapat empat sub-program yakni *input*, *calculation*, *output*, dan *curve*. Berikut gambaran umum masing-masing subprogram.

- a. Program Masukan (*Input*)



Gambar 2.14 Jendela Sub Program Masukan (*Input*)

(Sumber: Plaxis, 2024)

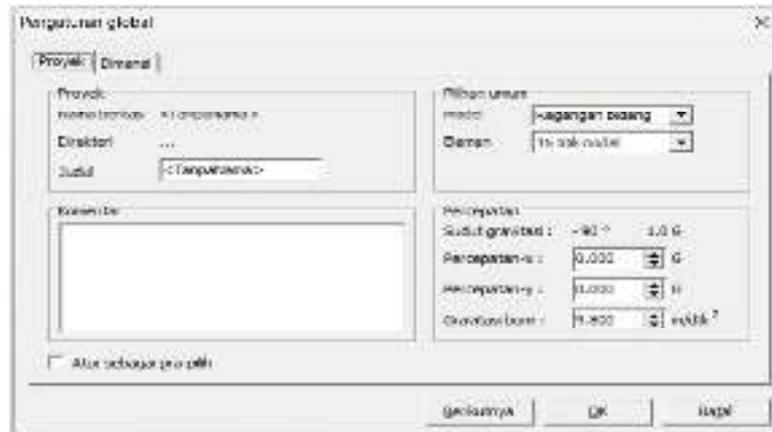
Gambar 2.14 di atas menggambarkan subprogram *Input*. subprogram ini memiliki submenu yang mencakup hampir semua pilihan untuk mengkonfigurasi *file*, mentransfer data, memunculkan grafik, membuat pemodelan geometri, menghasilkan jaring elemen hingga, dan memasukkan data atau material umum. Program input disusun dalam submenu berikut yakni *File*, *Edit*, *View*, *Geometry*, *Loads*, *Materials*, *Mesh*, *Initial*, dan *Help*.

Saat mengerjakan subprogram *Input*, ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan:

1. Pengaturan Umum (*General Setting*)

Dalam tahap ini, Anda dapat menggunakan jenis elemen 6 atau 15 titik nodal untuk mewakili lapisan tanah dan kelompok volumetrik lainnya. Selain itu, Anda mempunyai pilihan untuk memilih model regangan bidang untuk

geometri dengan penampang melintang yang relatif seragam atau *axissymmetry* untuk penampang melingkar (lihat Gambar 2.15).



Gambar 2.15 Tampilan Menu *General Settings*

(Sumber: Plaxis, 2024)

2. Geometri

Pembuatan model geometri yang mewakili masalah yang sedang dievaluasi merupakan tahapan awal dari pembuatan model *finite element*. Geometri model ini mencakup titik, garis, dan *cluster*. Titik dan garis disediakan oleh pengguna, sedangkan *cluster* dihasilkan oleh perangkat lunak.

3. Data Material (🇮🇩)

Data material dapat diaktifkan dengan memilihnya dari submenu "*Materials*" pada *toolbar*. Untuk mulai memasukkan data material, pilih tombol "New" pada layar "*Material Sets*", dan jendela baru akan terbuka. Selanjutnya, pengguna dapat memasukkan data parameter tanah.

4. Penyusunan Jaring Elemen (🇮🇩)

Setelah geometri model ditentukan secara lengkap dan sifat material ditetapkan ke semua *cluster* dan elemen struktur, geometri perlu dibagi menjadi beberapa elemen untuk analisis elemen hingga. Pembagian ini dikenal sebagai jaring elemen hingga. Anda dapat mengontrol jumlah dan ukuran segitiga yang dibuat. Plaxis menawarkan berbagai opsi untuk ini, mulai dari yang sangat kasar hingga yang sangat halus.

5. Kondisi Awal

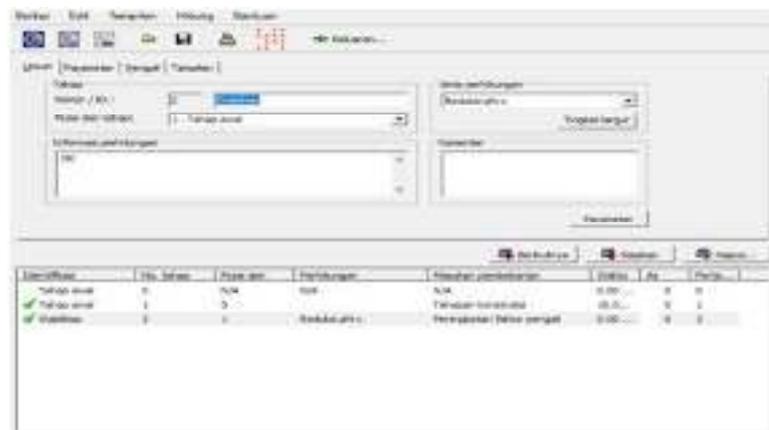
Setelah membuat model geometri dan menyelesaikan *mesh* elemen hingga, langkah selanjutnya adalah menentukan tegangan awal dan konfigurasinya. Hal ini dicapai dengan menggunakan mode penentuan kondisi awal dalam program *input*. Terdapat dua mode untuk mengatur kondisi awal yakni satu untuk menghitung tekanan air dan satu lagi untuk menentukan konfigurasi geometri awal. Untuk beralih di antara mode-mode ini, cukup tekan tombol  “switch” pada *toolbar*.

b. Program Perhitungan (*Calculations*)

Ketika model *finite element* disiapkan, analisis dengan *finite element* dapat dikerjakan. Oleh sebab itu, penting untuk menentukan model penghitungan yang akan dilakukan dan menentukan tahap pemuatan atau konstruksi mana yang akan diaktifkan selama penghitungan. Ketika mengerjakan sub-program perhitungan, beberapa faktor perlu dipertimbangkan, termasuk:

1. Pengaturan Perhitungan Umum

Tab *general* digunakan untuk mengatur parameter untuk tahapan perhitungan tertentu, biasanya seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Tampilan Menu Perhitungan

(Sumber: Plaxis, 2024)

Terdapat sub menu yang harus dicermati pada lembar *general* adalah sebagai berikut:

a) *Phase*

Pilihan dalam kotak *phase* membantu mengidentifikasi dan mengurutkan tahapan perhitungan, memungkinkan Anda menentukan tahap mana yang harus menjadi titik awal untuk perhitungan saat ini.

b) *Calculation Type*

Untuk mengidentifikasi model perhitungan, Anda dapat menyesuaikan pengaturan yang terdapat di sebelah kanan atas pada tab *general*. Jenis perhitungan dapat dikategorikan kedalam tiga jenis yakni:

1) Perhitungan Plastik (*Plastic Calculation*)

Metode perhitungan ini diperuntukkan dalam menganalisis deformasi elastis-plastik tanpa perlu memperhitungkan pengurangan tekanan air pori berlebih dari waktu ke waktu.

2) Analisa Konsolidasi (*Consolidation Analysis*)

Analisis konsolidasi digunakan untuk menguji bagaimana kelebihan tekanan air pori berkembang di tanah liat jenuh air dari waktu ke waktu. Jenis analisis ini, yang mempertimbangkan perilaku elastis dan plastis, dapat dilakukan dengan menggunakan Plaxis.

3) Reduksi Phi-C (*Phi-C Reduction/Analisis Keamanan*)

Pada Plaxis, evaluasi terhadap keselamatan dapat dikerjakan dengan menurunkan parameter kekuatan tanah. Metode ini digunakan ketika menganalisis faktor keselamatan global untuk skenario khusus.

4) Perhitungan Dinamik (*Dynamic Calculation*)

Perhitungan ini diterapkan bila beban yang terlibat bersifat dinamis (bergerak) dan bukan statis (stasioner), seperti yang disebabkan oleh gempa bumi.

c. Program Keluaran (*Output*)

Hasil utama dari analisis elemen hingga adalah perpindahan pada suatu titik tertentu dan variasi tegangan pada lokasi yang ditinjau. *Output* program juga dapat memberikan informasi berbagai parameter, seperti:

1. Deformasi
2. Perpindahan Total, Horizontal, dan Vertikal
3. Regangan (*total, cartesian, dan incremental strain*)

4. Tegangan (*effective* dan *total stresses*)
5. *Over Consolidations Ratio* (OCR)
6. Titik Plastis (*Plastis Point*)
7. Tekanan aktif pori (*active pore pressure*)
8. Tekanan air pori berlebih (*excess pore pressure*)
9. *Ground Water Head*
10. *Flow Field* dan Derajat Kejenuhan (*Degree Of Saturation*)

d. Program Kurva (*Curve*)

Program kurva memungkinkan pembuatan kurva beban versus *displacement*, diagram tegangan-regangan, dan garis tegangan atau regangan berdasarkan titik-titik yang dipilih dan dimodelkan secara geometris. Kurva-kurva ini menggambarkan perkembangan dari berbagai perhitungan di berbagai fase dan menawarkan wawasan global dan lokal mengenai perilaku tanah.

2.10 Keaslian Penelitian

Sepengetahuan penulis, penelitian tentang Perbandingan Alternatif Penanganan Timbunan Pasca Longsor Di Ruas Tol Tebing Tinggi-Indrapura ini belum pernah dilakukan.

Tabel 2.18 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Sekarang

| Nama Peneliti | Judul Penelitian | Tujuan Penelitian | Kesimpulan Penelitian |
|---------------------------|---|--|---|
| Nabilla Zahera dkk (2019) | Analisis Kekuatan Struktur <i>Minipile</i> Pasca Keruntuhan Dengan Menggunakan <i>Software</i> Plaxis V8.6 (Studi Kasus: Landasan Bandara Samarinda Baru, Kota Samarinda) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Analisis sifat material yang relevan dengan daerah penelitian menggunakan teknik analisis balik dengan faktor keamanan ditetapkan 1. 2. Mengumpulkan data faktor keamanan disaat menyelesaikan konstruksi pada kedalaman <i>minipile</i> 6m, 7m, | Berdasarkan hasil factor keamanan yang ditentukan sebelumnya, geometri yang direkomendasikan sesuai dengan faktor keamanan 2 yang diizinkan oleh perusahaan. Faktor keamanan 2 ini dicapai pada kedalaman 8 m dan 9 m mulai tahun kesepuluh. Namun pada tahun ketiga, |

| | | | |
|-----------------------|---|---|--|
| | | <p>8m, 9m, 10m, 11m, dan 12m.</p> <p>3. Memberikan rekomendasi geometri konstruksi jika faktor keamanannya 2.</p> | <p>kedalaman 10 m memberikan faktor keamanan sebesar 2,01. Pada tahun pertama pasca konstruksi, kedalaman 11 m untuk <i>minipile</i> mencapai faktor keamanan 2,03, dan kedalaman 12 m menghasilkan faktor keamanan 2,21. Mengingat bandara akan segera mulai beroperasi dan masa konsolidasi selama konstruksi dibatasi hingga 1 tahun, maka disarankan untuk menggunakan <i>minipile</i> pada kedalaman 11 m untuk perkuatan.</p> |
| Juanda Hartono (2020) | <p>Analisis Penanganan Longsoran Dengan Perkuatan <i>Minipile</i> Menggunakan <i>Software</i> Plaxis V8.2</p> <p>Pembangunan Jalan Tol Balikpapan Samarinda</p> | <p>1. Mengumpulkan temuan metode penanganan longsoran yang direkomendasikan untuk ruas antara STA 2+850 dan STA 3+125.</p> <p>2. Menilai hasil faktor keamanan pada saat menyelesaikan konstruksi pada kedalaman <i>minipile</i> 6 meter dan 9 meter.</p> | <p>Berdasarkan analisis dan pembahasan disimpulkan bahwa faktor keamanan (SF) berkisar antara 1,139 hingga 1,832, dengan SF 1,30 atau lebih tinggi yang direkomendasikan untuk keselamatan lapangan. Penguatan dilakukan dengan menggunakan <i>minipile</i> sepanjang 6 meter (8 buah) dan <i>minipile</i> sepanjang 9 meter (10 buah) dengan jarak 1 meter. Dalam model 1, SF sebesar 1,821 melebihi SF minimum yang diperbolehkan di</p> |

| | | | |
|-----------------------------|---|--|--|
| | | | lapangan. Ketika geotekstil tambahan diterapkan pada perkuatan (model 2), SF meningkat menjadi 1,832, dan perpindahan total adalah 0,084 meter. |
| Rahmita Zerisa (2022) | Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan <i>Minipile</i> Dengan Metode Elemen Hingga (Studi Kasus: Lereng Jalan Tol Seksi V Pekanbaru - Dumai STA 79+550) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Untuk menilai faktor keamanan lereng timbunan tanah asli menggunakan metode elemen hingga dan metode Fellenius. 2. Untuk mengevaluasi faktor keamanan desain lereng dengan perkuatan geotekstil dan penggantian tanah dasar menggunakan metode elemen hingga. 3. Untuk mengetahui daya dukung <i>minipile</i> sebagai perkuatan timbunan berdasarkan data sondir. 4. Menganalisis faktor keamanan perencanaan lereng menggunakan kombinasi perkuatan <i>minipile</i> dan geotekstil, dengan mempertimbangkan variasi dengan dan tanpa penggantian tanah dasar, melalui metode elemen hingga. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Plaxis tidak dapat menunjukkan faktor keamanan (SF) pada saat perhitungan keruntuhan, sehingga digunakan metode Fellenius untuk perhitungan manual, sehingga menghasilkan SF sebesar 0,9826 untuk kemiringan saat ini. 2. Analisis daya dukung izin untuk <i>minipile</i> sepanjang 12 m kurang sesuai karena kurang dari beban yang dibutuhkan yaitu 177 kN. Namun, <i>minipile</i> sepanjang 15 m dapat diterima karena daya dukungnya melebihi beban yang diterapkan. 3. Faktor keamanan (SF) untuk model 1, yang melibatkan perkuatan <i>minipile</i> tanpa penggantian tanah dasar pada konstruksi |

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | <p>timbunan, beban jalan, konsolidasi, dan kondisi gempa, tidak memenuhi kriteria keselamatan yaitu kurang dari 1,25. Sebaliknya, model 2, yang mencakup perkuatan <i>minipile</i> dengan penggantian tanah dasar sepanjang 1,25 m, memenuhi kriteria dan dianggap aman untuk penerapan di lapangan.</p> |
| <p>Akhdan Fajri Ramadan dkk (2022)</p> | <p>Evaluasi Kelongsoran Dan Alternatif Perkuatan Menggunakan Geotekstil Dengan Program Geoslope (Studi Kasus: Kelongsoran Tol Cipali KM 122 Jalur B)</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Menentukan kondisi kestabilan lereng untuk wilayah Subang, Jawa Barat. 2. Identifikasi penguatan yang tepat untuk meningkatkan faktor keamanan (SF). 3. Membandingkan nilai faktor keamanan (SF) dengan yang diperoleh dari perhitungan Geoslope. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Stabilitas awal lereng, tanpa memperhitungkan gempa bumi, dihitung sebesar 1,5 menggunakan hasil SLOPE/W, yang menunjukkan lereng stabil (Bowles, 1993). Namun ketika factor gempa ($K_h=0,2$) diterapkan pada wilayah Subang Jawa Barat, faktor keamanan (FK) turun menjadi 0,9, menunjukkan penurunan sebesar 40% dan menghasilkan kesimpulan bahwa lereng tidak stabil. 2. Untuk meningkatkan nilai FK, dilakukan upaya |

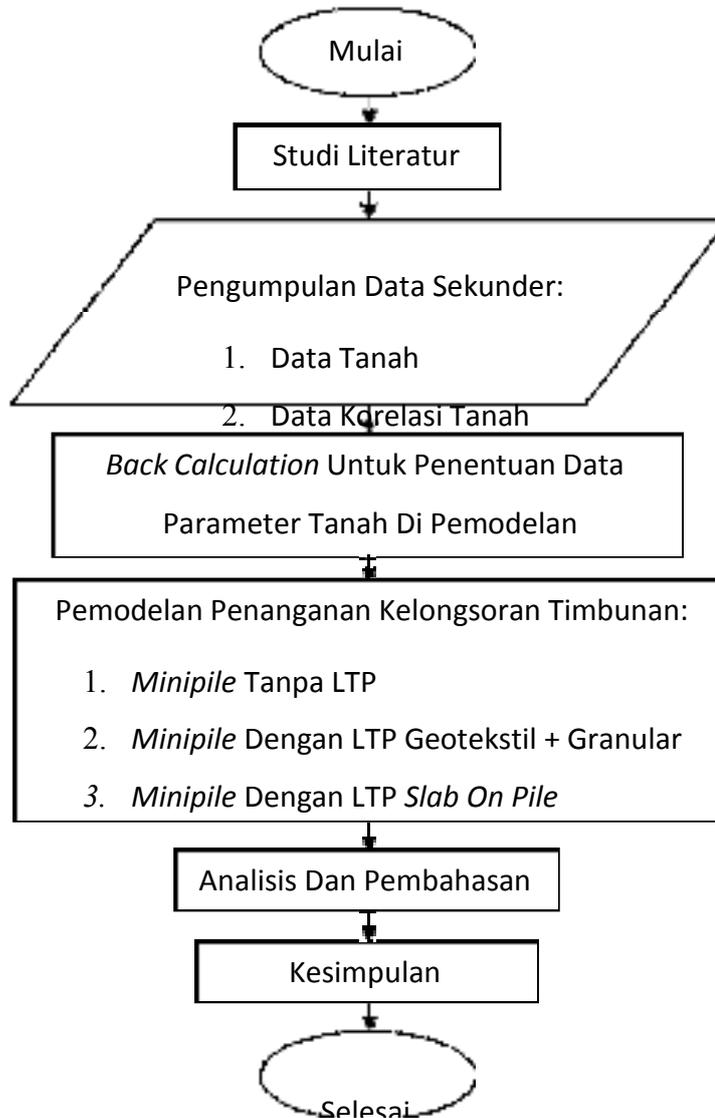
| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | <p>alternatif seperti penambahan geotekstil. Geotekstil yang digunakan adalah Polyfelt WX 200/50, dengan jarak vertikal (Sv) terbagi menjadi dua zona yaitu 0,30 m dan 0,60 m. FK sebesar 1,49 dicapai dengan longsor internal. Untuk mengoptimalkan dan mengurangi biaya pelaksanaan, jarak dapat ditingkatkan hingga faktor keamanan mencapai antara 1,1 dan 1,2, atau disesuaikan dari Jarak 0,5 (zona 1) dan 0,6 (zona 2).</p> <p>3. Perhitungan menunjukkan bahwa nilai FK untuk lereng yang diperoleh dari metode manual hamper sama dengan nilai FK dari program SLOPE/W, dengan selisih rata-rata sebesar 6,25% untuk kondisi awal dan 15% untuk memperhitungkan gempa bumi. Konsistensi ini disebabkan program SLOPE/W</p> |
|--|--|--|---|

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | menggunakan metode keseimbangan batas yang sama dengan teori stabilitas yang ada. |
|--|--|--|---|

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan pengerjaan pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Kriteria Desain

Kriteria desain atau acuan yang digunakan dalam tinjauan penurunan yakni sebagai berikut:

Tabel 3.1 Kriteria Desain Geoteknik

| Tinjauan | Kriteria Desain | Keterangan | Sumber |
|------------------------------------|-----------------|---|---|
| Penurunan Total | Min. 100 mm | Penurunan mutlak setelah pelaksanaan perkerasan | Manual Desain Perkerasan Jalan Tahun 2017 |
| Kecepatan Penurunan | < 20 mm / tahun | Penurunan yang terjadi selama pelaksanaan adalah penurunan yang terjadi sebelum perkerasan jalan dilaksanakan | Pedoman Kimpraswil No: Pt T-10-2002-B |
| Stabilitas Timbunan Kondisi Statik | Min. 1,5 | | SNI 8460:2017 KOMTEK |
| Stabilitas Timbunan Kondisi Gempa | Min. 1,1 | | SNI 8460:2017 KOMTEK |

(Sumber: Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

3.3 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di jalan tol ruas Tebing Tinggi-Indrapura tepatnya pada STA 103+350 yang mengalami kelongsoran setelah dilakukan penimbunan. Gambar 3.2 menunjukkan hal tersebut dengan jelas.



Gambar 3.2 Lokasi Penelitian

(Sumber: Geotechnical Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

3.4 Studi Literatur

Studi literatur ini diperoleh melalui pembacaan dan perumusan ringkasan dari buku serta referensi yang relevan dengan penelitian, yang terdiri dari:

- a. Referensi mengenai perhitungan stabilitas timbunan.

- b. Referensi mengenai perencanaan sistem *Minipile* tanpa LTP dan dengan LTP yang terdiri dari sistem geotekstil + granular, dan sistem *Slab On Pile* untuk sistem perkuatan timbunan.
- c. Referensi mengenai formula yang mendukung.

3.5 Pengumpulan Data Sekunder

Pada studi ini, data diperlukan untuk mengevaluasi stabilitas timbunan pada ruas jalan dengan metode *Finite Element*. Data yang digunakan adalah data sekunder yang berasal dari proyek pembangunan jalan tol Tebing Tinggi-Indrapura STA 103+350. Data tersebut mencakup:

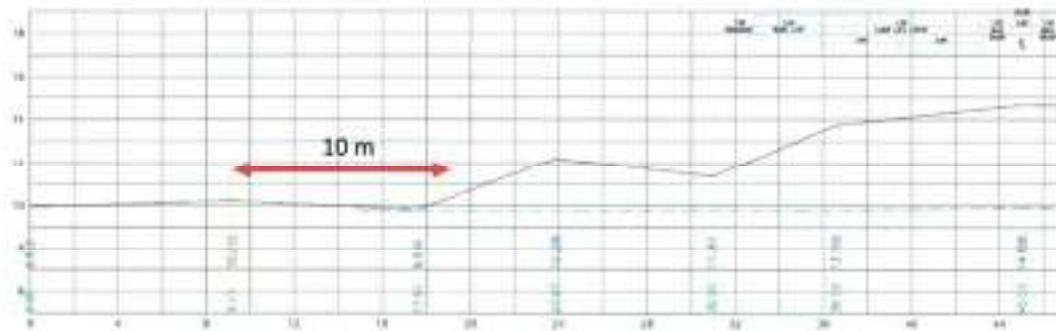
- a. Data Tanah
- b. Data Korelasi Tanah

3.6 Analisa Balik (*Back Calculation*)

Analisis balik (*Back Calculation*) dilakukan untuk menentukan parameter geoteknik saat terjadinya longsor, dengan menggunakan data desain karakteristik mekanis material. Berbagai metode dapat digunakan untuk melakukan perhitungan balik, termasuk:

- a. Secara manual menggunakan *try and error* untuk menyelaraskan data input dengan hasil yang diamati.
- b. Analisis dampak setiap variabel secara individual.
- c. Analisis probabilitas untuk dua variabel yang saling terkait.
- d. Pendekatan probabilistik tingkat lanjut untuk menganalisis beberapa parameter secara bersamaan.

Evaluasi dilakukan memakai metode *finite element*, yang memerlukan data tanah baru untuk dianalisis. Data tinggi timbunan eksisting menggunakan data potongan melintang hasil topografi terbaru. Analisis dimulai dengan proses *back calculation* untuk mengetahui parameter tanah saat terjadinya longsor, dilanjutkan dengan analisis perkuatan. Berikut ini merupakan gambar potongan melintang di STA 103+350 yang merupakan area dengan kondisi longsoran paling ekstrim.



Gambar 3.3 Geometri Lereng Longsoran

(Sumber: Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

Heaving yang terjadi berjarak 10 m dari kaki timbunan eksisting. Dengan menggunakan geometri longsoran di atas, maka berikut ini merupakan hasil analisis *back calculation*.



Gambar 3.4 Geometri Tanah

(Sumber: Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

Tabel 3.2 Data Parameter Tanah

| ID | Name | Model | Kondisi | γ_{unsat} (kN/m^3) | γ_{sat} (kN/m^3) | E_{ref} (kN/m^2) | ν (-) | C_{ref} (kN/m^2) | ϕ ($^{\circ}$) |
|----|---------------|--------------|-----------|--|--|---|--------------|---|--------------------------|
| 1 | Timbunan | Mohr-Coulomb | Undrained | 16 | 18 | 11250 | 0.33 | 45 | 0 |
| 2 | Pasir | Mohr-Coulomb | Drained | 14 | 18 | 3000 | 0.33 | 0 | 26 |
| 3 | Humus | Mohr-Coulomb | Undrained | 16 | 18 | 3750 | 0.33 | 15 | 0 |
| 4 | Lempung Lunak | Mohr-Coulomb | Undrained | 16 | 18 | 5000 | 0.33 | 13.5 | 0 |
| 5 | Pasir | Mohr-Coulomb | Drained | 14 | 18 | 2200 | 0.33 | 0 | 26 |
| 6 | Pasir Sedang | Mohr-Coulomb | Drained | 15 | 17 | 10000 | 0.33 | 0 | 34 |
| 7 | Pasir Padat | Mohr-Coulomb | Drained | 17 | 19 | 45000 | 0.33 | 0 | 38 |

(Sumber: Hasil Analisis, 2024)

3.7 Pemodelan Penanganan Kelongsoran Timbunan

Penanganan yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan perhitungan dengan metode *finite element*. Adapun perkuatan yang dipakai dalam studi ini yakni:

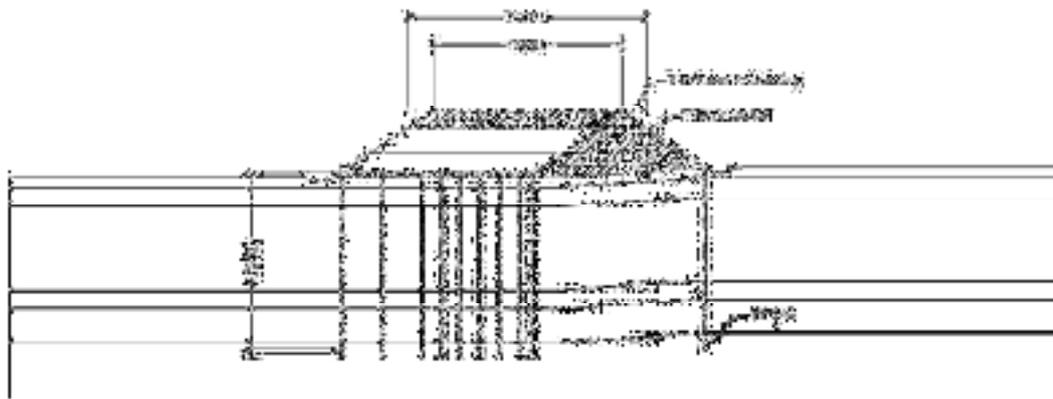
3.7.1 Pemodelan Dengan *Minipile* Tanpa *Load Transfer Platform (LTP)*

Minipile yang dipakai adalah *minipile* dengan dimensi 20 cm x 20 cm. Kedalaman *minipile* yang digunakan adalah -18 meter. Spasi yang dibutuhkan di badan timbunan adalah sebesar 2 m dan untuk di kaki timbunan menggunakan 4 meter. Dibawah ini merupakan parameter *minipile* yang digunakan.

Tabel 3.3 Data Parameter *Minipile*

| Minipile | | | |
|----------------------------|---|-------------|----------------------|
| Plate Thickness (b) | : | 0,20 | m |
| Concrete Quality ($f'c$) | : | 41,50 | Mpa |
| A ₂ | : | 0,2 | M ² |
| E ₂ | : | 6055526 | Kpa |
| I ₂ | : | 0,000666667 | M ⁴ |
| EA | : | 1211105 | kN/m |
| EI | : | 4037,02 | kN m ² /m |
| w | : | 4,8 | kNm/m |
| v | : | 0,20 | |

(Sumber: Hasil Analisis, 2024)

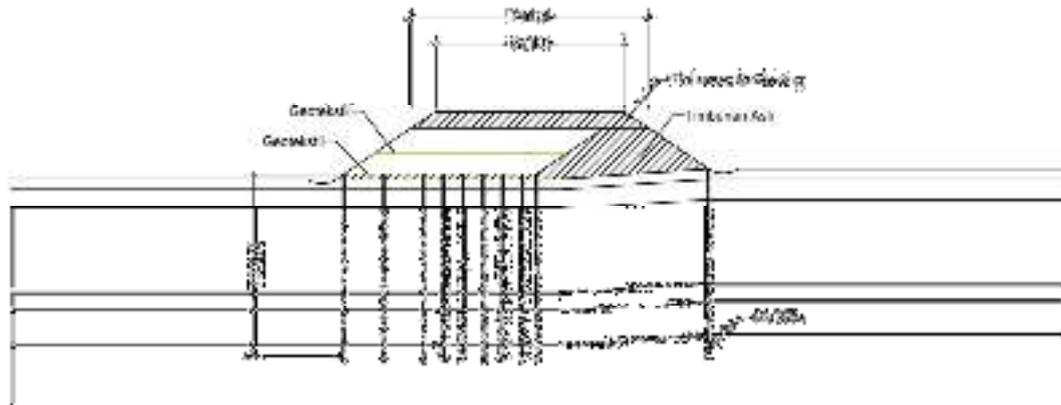


Gambar 3.5 Sketsa Pemodelan *Minipile* Tanpa LTP

(Sumber: Autocad, 2024)

3.7.2 Pemodelan Dengan *Minipile* Dengan LTP Geotekstil + Granular

Konsep penanganan yang dilakukan adalah berupa penggunaan *minipile* serta penambahan geotekstil stabilisator ditambah dengan bahan granular dengan kuat tarik ultimate minimum 50 kN/m.



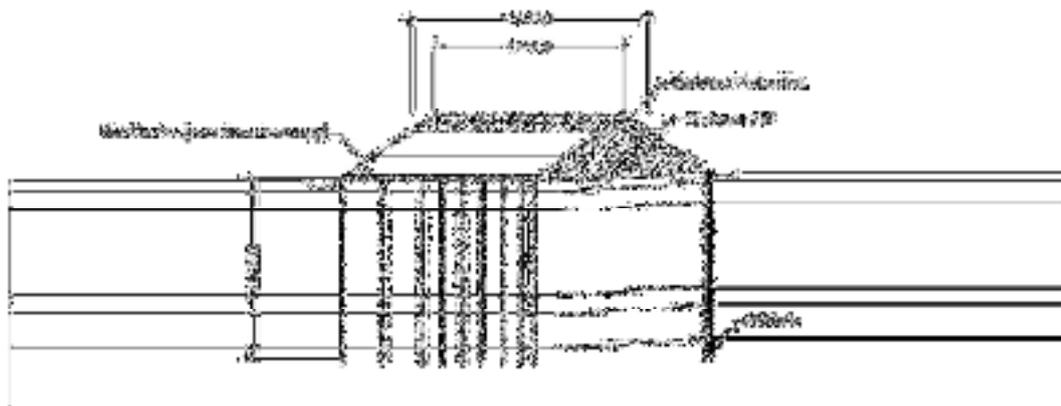
Gambar 3.6 Sketsa Pemodelan *Minipile* + LTP Geotekstil

(Sumber: Autocad, 2024)

3.7.3 Pemodelan Dengan *Minipile* Dengan LTP *Slab On Pile*

Penanganan yang selanjutnya adalah perkuatan *minipile* dengan LTP beton bertulang (*Slab On Pile*). Perencanaan yang akan dianalisis pada pemodelan penanganan ini yaitu:

- a. Merencanakan tebal pelat (*slab*)
- b. Merencanakan kedalaman tiang
- c. Menghitung banyaknya tiang



Gambar 3.7 Sketsa Pemodelan *Minipile* + LTP *Slab On Pile*

(Sumber: Autocad, 2024)

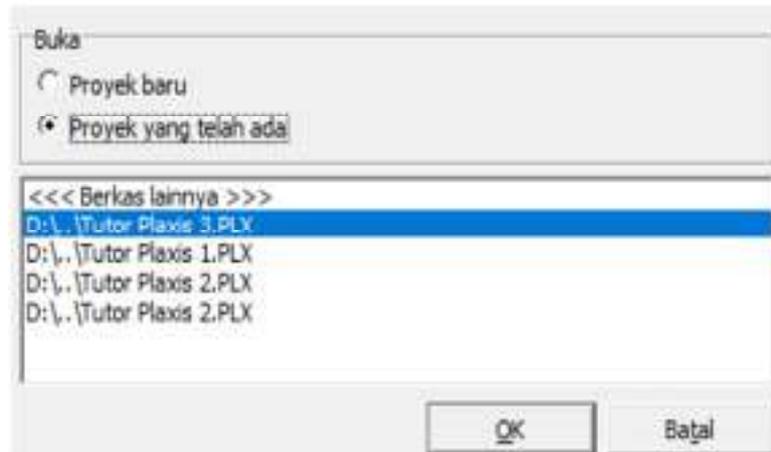
3.7.4 Pemodelan Dengan Plaxis

Metode ini melibatkan analisis parameter tanah menggunakan *software* Plaxis melalui tiga tahap yaitu *Input*, *Calculation*, dan *Output* untuk memeriksa variasi kondisi tanah yang tidak terdrainase dan terdrainase dengan dan tanpa perkuatan *minipile*.

a. *Plaxis Input*

1. Buka/*Open* Program Plaxis

Jalankan *software* Plaxis dengan cara menekan dua kali gambar program *Input* Plaxis. Ini akan menampilkan kotak dialog dengan pilihan menu “Proyek Baru/Proyek Yang Telah Ada”. Pilih “Proyek Baru” dan klik “OK”, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.8.

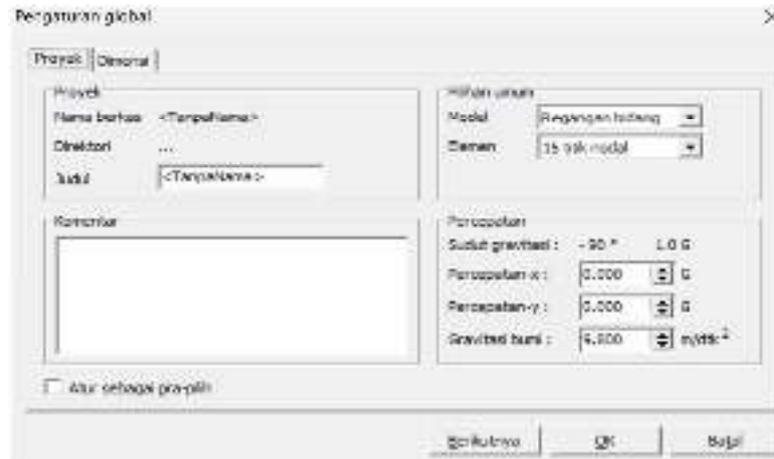


Gambar 3.8 Kotak Dialog *Create/Open Project*

(Sumber: *Plaxis, 2024*)

2. *General Setting*

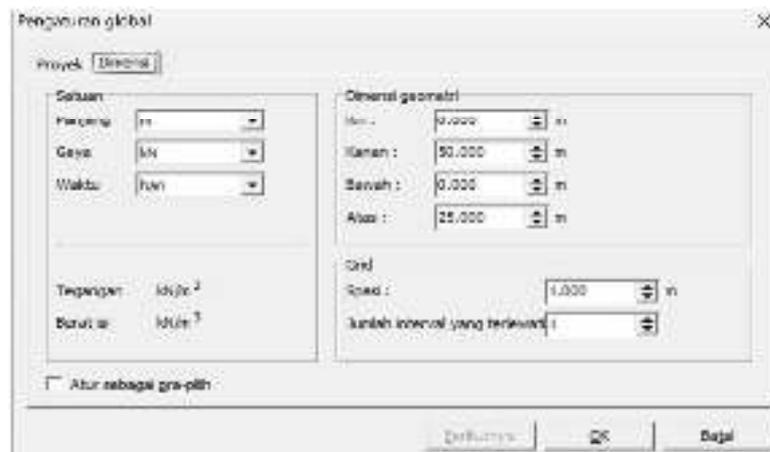
Di tahapan berikut, Anda akan menemukan dua jendela tab yakni “Proyek” dan “Dimensi”. Pada tab “Proyek”, masukkan judul proyek pada kotak dialog “Judul”. Untuk analisis model, pilih “*Plane Strains*” atau regangan bidang pada pengaturan umum dan pilih tipe elemen dasar 15-Node (titik nodal) supaya mendapatkan hasil tegangan dan beban keruntuhan yang lebih presisi. Pengaturan ini dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Tab Proyek Dari Menu *General Setting*

(Sumber: Plaxis, 2024)

Dalam pilihan tab "Dimensi", pada jendela "Satuan" gunakan satuan (Panjang = m, Gaya = kN, dan Waktu = hari), kemudian klik OK.



Gambar 3.10 Tab Dimensi Dari Menu *General Setting*

(Sumber: Plaxis, 2024)

3. Pemodelan Geometri

Langkah-langkah yang digunakan dalam mengilustrasikan model geometri yaitu:

- a) Tekan opsi *Geometry Line* ()

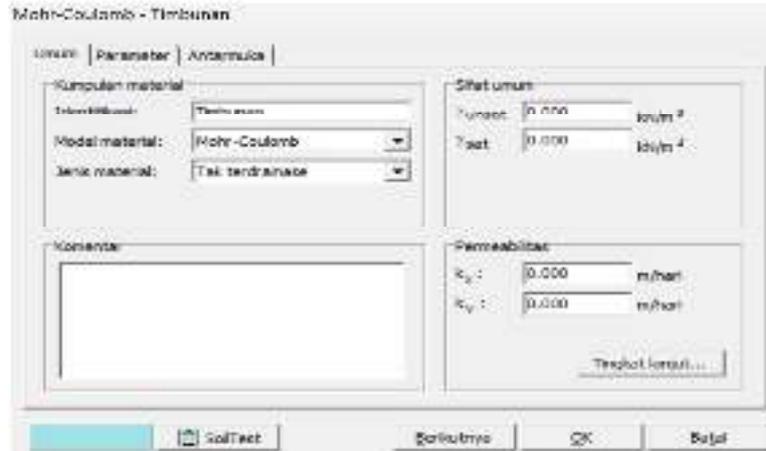
Kursor harus ditempatkan di posisi tengah. Lalu, atur kursor ke koordinat 0, 0 sebagai titik awal untuk menggambar bentuk geometri. Setelah itu, buat model geometri berdasarkan koordinat yang telah ditetapkan.

- b) Tekan tombol *Standard Fixities* pada *toolbar* ()
Plaxis selanjutnya akan menerapkan kondisi batas umum pada geometri secara otomatis.

4. *Input* Parameter Tanah ()

Masukkan parameter tanah ke dalam *software* dengan mengklik pilihan "*Material Sets*" atau dengan menggunakan opsi yang terdapat di menu *material*.

- a) Di bagian bawah jendela *material sets*, pilih opsi "*New*". Ini akan membuka kotak dialog dengan tiga tab antara lain "Umum", "Parameter", dan "Antarmuka".
- b) Pada tab umum di kotak dialog *material sets*, masukkan "Timbunan" ke dalam kotak "Identifikasi".
- c) Kemudian, pilih Mohr-Coulumb di menu "Model Material" dan pilih *Undrained* atau *Drained* di menu "Jenis Material".
- d) Masukkan nilai untuk "Sifat Umum" dan bidang "Permeabilitas" berdasarkan properti material yang digunakan.
- e) Pilih menu "Parameter", di mana Anda akan menemukan empat tab. Masukkan nilai berdasarkan parameter yang dipilih. Untuk jendela "Antarmuka", pilih opsi berdasarkan *software* Plaxis. Terakhir, tekan OK untuk menyimpan parameter.
- f) Tekan kemudian seret set data dari jendela *material sets* ke setiap lapisan geometri tanah, kemudian lepaskan. Material akan ditambahkan ke bidang gambar, dan Anda akan mengetahui bahwa material telah berhasil diterapkan jika setiap lapisan geometri tanah sudah berubah warna.
- g) Selanjutnya, tekan OK di jendela *material sets* untuk menutup klasifikasi material.



Gambar 3.11 Tab Umum Pada Jendela *Material Sets*

(Sumber: Plaxis, 2024)

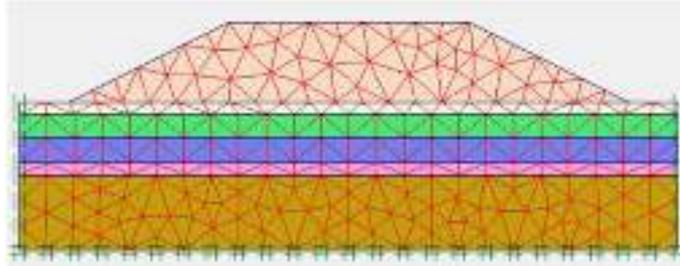


Gambar 3.12 Tab Parameter Pada Jendela *Material Sets*

(Sumber: Plaxis, 2024)

5. Jaringan Elemen Hingga ()

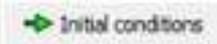
Pilih opsi “Jaringan Elemen” dari *toolbar* atau pilih opsi dari menu *mesh*. Setelah *meshing* dibuat, sebuah jendela baru muncul yang menampilkan jaringan elemen hingga, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.13. Setelah itu, tekan <perbarui> untuk beralih ke pemodelan geometri.

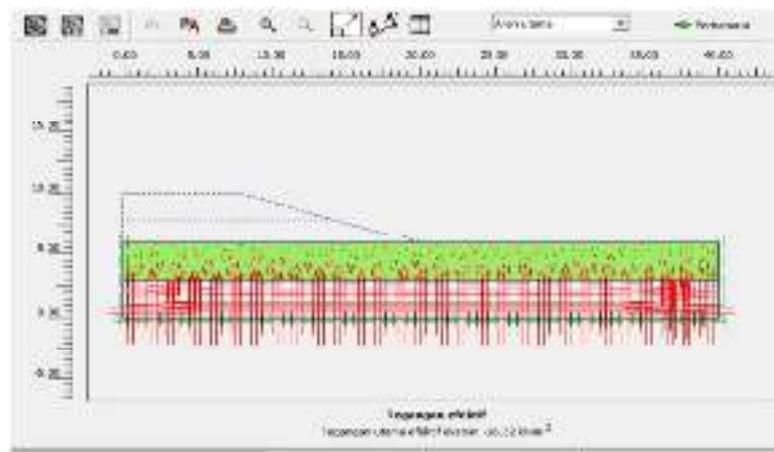


Gambar 3.13 Jaringan Elemen Hingga (*Meshing*)

(Sumber: Plaxis, 2024)

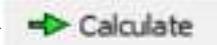
6. *Initial Condition*

- a) Tekan atau pilih tombol “*Initial Condition*” ().
- b) Tekan tombol “*Level Muka Air Tanah*” (), kemudian pilih titik pertama dan terakhir guna mengatur MAT.
- c) Tekan tombol () untuk menghasilkan tekanan air.
- d) Tekan tombol ke bagian kanan dari “*Switch*” ().
- e) Tekan tombol () pada *toolbar*. Ini akan membuka kotak dialog *Ko-procedure*. Kemudian, pilih “*Update*”, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.14 berikut.



Gambar 3.14 Tegangan Awal Pada Geometri

(Sumber: Plaxis, 2024)

- f) Kemudian tekan “*Calculate*” ().

c. *Plaxis Output*

Setelah keseluruhan tahapan telah selesai dianalisis, kemudian klik tombol

 untuk menunjukkan hasil dari tahapan-tahapan yang telah dianalisis.

3.8 Kesimpulan

Kesimpulan melibatkan penarikan ringkasan akhir berdasarkan pembahasanyang dilakukan dalam penelitian ini