

2 LANDASAN TEORI

2.1 Jalan

Jalan adalah sarana yang menghubungkan antara satu wilayah dengan wilayah lainnya. Jalan juga merupakan elemen vital dalam infrastruktur transportasi, yang memegang peranan penting dalam mendukung berbagai aspek seperti ekonomi, sosial, budaya, dan lingkungan. Ini dilakukan dengan menerapkan strategi pengembangan wilayah untuk mencapai keseimbangan dan kesetaraan dalam pembangunan antar daerah (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2022).

2.2 Tanah Dasar

Tanah dasar atau *subgrade* merujuk pada tanah bagian bawah yang berperan sebagai lokasi pemasangan lapisan perkerasan dan mendukung pembangunan perkerasan jalan di atasnya. Tanah dasar berupa tanah asli yang dipadatkan seperti tanah galian, urugan, dan tanah asli.

Keandalan dan masa pakai konstruksi perkerasan jalan sangat bergantung pada karakteristik dan kemampuan dukung tanah dasar. Umumnya, permasalahan terkait tanah dasar yaitu sebagai berikut.

1. Perubahan permanen bentuk atau deformasi permanen sebagai akibat dari beban lalu lintas.
2. Sifat perubahan volume tanah, baik pembengkakan maupun penyusutan, karena variasi kadar air.
3. Ketidakmerataan daya dukung tanah yang disebabkan oleh perbedaan sifat tanah di lokasi yang berdekatan atau akibat kesalahan dalam pelaksanaan yang dapat mengakibatkan kurang optimalnya kepadatan.

2.2.1 Tanah Lunak

Perencanaan pembangunan jalan seringkali menghadapi hambatan, dan salah satu masalah yang sering muncul adalah tanah dalam kondisi kurang optimal, khususnya tanah lunak. Di Indonesia, tanah lunak menjadi hal yang umum

dijumpai. Tanah lunak adalah tanah yang memiliki rongga kapiler yang sangat kecil, sehingga waktu yang diperlukan untuk proses konsolidasi saat tanah diberi beban menjadi cukup lama (Aripindi et al., 2022). Karakteristik tanah lunak yang memiliki kekuatan yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi menyebabkan permasalahan daya dukung dan penurunan (Gusnadi et al., 2023).

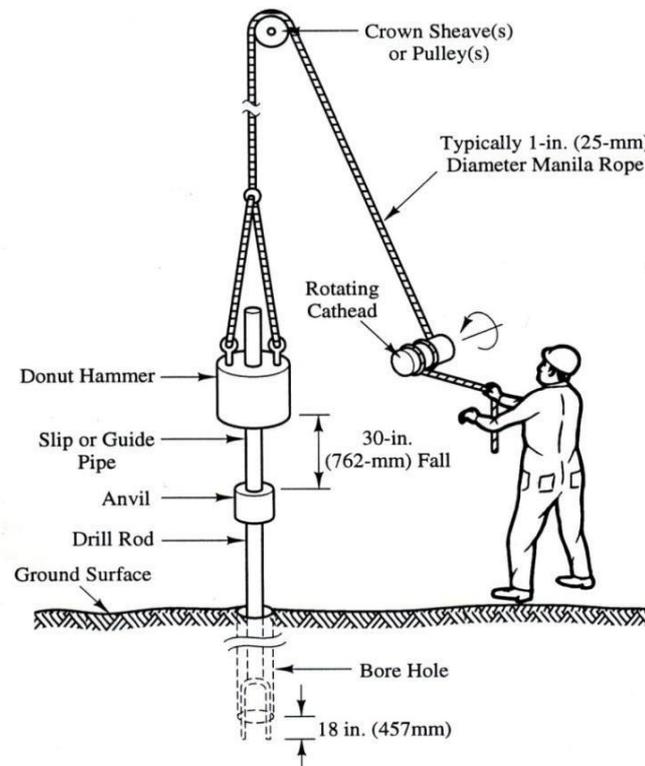
Dalam penanganan tanah lunak biasanya menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) yang digabungkan dengan *preloading* atau prapembebanan menggunakan tanah timbunan. Meskipun demikian, untuk tanah yang sangat sensitif sebagai contoh tanah ekspansif, metode tersebut tidak sesuai untuk diterapkan. Selain itu, pada tanah dengan lapisan kompresibel yang tidak terlalu tebal, penggunaan *vertical drain* tidak efektif. Sebagai alternatif, perbaikan tanah melalui penggantian tanah telah menjadi pilihan untuk kondisi tanah lunak yang tidak terlalu tebal. Pendekatan ini dapat meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi ketebalan lapisan tanah yang mudah terkompresi, tetapi memerlukan analisis perancangan yang cermat (SNI 8460, 2017).

2.2.2 Penyelidikan Tanah di Lapangan

Penyelidikan tanah di lapangan bertujuan untuk mendapatkan informasi mengenai struktur lapisan tanah atau batuan dan kedalaman muka air tanah di lokasi penelitian. Pengujian tanah di lapangan dapat dilakukan melalui dua metode, yaitu metode yang bersifat merusak (*destructive tester*) dan metode yang bersifat tidak merusak (*non-destructive tester*) (Dwipayana, 2023). Dalam penelitian ini, metode pengujian yang digunakan adalah Uji *Standard Penetration Test* (SPT).

Uji SPT adalah pengujian in-situ yang umumnya digunakan untuk menentukan sifat rekayasa geoteknik tanah dibawah permukaan. Hal ini memberikan indikasi kekompakan dan konsistensi tanah langsung dari penyelidikan lapangan. Uji SPT ini melibatkan pergerakan tabung sampel standar berdinding tebal ke dalam tanah di dasar lubang bor dengan pukulan dari palu geser dengan berat standar dan jarak jatuh. Sebuah palu berbobot 63,5 kg yang jatuh bebas dari ketinggian 75 cm pada batang bor. Jumlah pukulan palu untuk mendorong penetrasi kedua dan ketiga sebesar 15 cm disebut dengan nilai N-SPT yang mewakili jumlah pukulan per 30 cm penetrasi. Sampel barel yang terpisah

akan digunakan untuk mendapatkan sampel representatif yang sesuai untuk pemeriksaan lapangan terhadap tekstur dan struktur tanah serta uji laboratorium. Gambar 2.1 menyajikan gambar mekanisme uji *Standard Penetration Test* (SPT).



Gambar 2.1 Mekanisme Uji *Standard Penetration Test* (SPT)

2.2.3 Uji Laboratorium

Dalam pengujian parameter tanah yaitu meliputi uji fisik, kuat geser, dan parameter konsolidasi.

2.2.3.1 Uji Fisik

1. Kadar Air Alami

Kadar air alami adalah perbandingan antara berat air yang dikandung tanah dengan berat tanah yang dinyatakan dalam persen.

2. Berat Jenis Tanah

Berat jenis tanah merupakan perbandingan antara butir-butir dengan air destilasi di udara dengan volume yang sama pada temperatur tertentu. Biasanya temperatur berkisar antara 27,5°C.

3. Batas *Atterberg*

Batas *atterberg* bertujuan untuk menentukan batas cair tanah. Dimana batas cair suatu tanah ini merupakan kadar air tanah pada keadaan batas peralihan antara cair dan keadaan plastis. Berikut Persamaan (2.1) untuk mencari kadar air.

$$\text{Kadar air} = \frac{\text{Berat air}}{\text{Berat tanah kering}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Plastisitas indeks = LL – PL

Dimana:

$$\begin{aligned} \text{LL} &= \text{Batas cair} \\ \text{PL} &= \text{Batas plastis} \end{aligned}$$

4. Uji Analisis Saringan pada Tanah

Uji Analisis Saringan pada Tanah dilakukan untuk memisahkan butiran tanah menurut kelompoknya dengan menggunakan ayakan dari berbagai ukuran sesuai dengan standar yang digunakan. Distribusi dari ukuran butiran disebut dengan gradasi. Nilai gradasi dinyatakan dalam presentase dari berat butiran yang tertinggal atau lewat didalam suatu saringan.

2.2.3.2 Uji Kompresi Tanpa Batas

Menurut (ASTM, 2006), tujuan dalam uji kompresi tanpa batas yaitu untuk mengukur kuat tekan bebas (*unconfined compressive strength*) dari tanah lempung atau lanau. Dari kuat tekan bebas dapat diketahui nilai kuat geser *undrained* (c_u) dan derajat kepekaan (*degree of sensitivity*).

2.2.3.3 Parameter Konsolidasi

Uji konsolidasi dilakukan pada sampel tidak terganggu dan sampel terganggu yang diambil di area proyek. Dalam uji konsolidasi satu dimensi dilakukan sesuai dengan Standar (ASTM D-2435, 2003). Parameter yang diambil dari uji konsolidasi satu dimensi yaitu seperti angka pori awal (e_o), tegangan prakonsolidasi (pc'), indeks kompresi (c_c) dan koefisien konsolidasi arah vertikal (c_v).

2.2.3.4 Uji Triaksial UU (*Unconsolidated Undrained*)

Dalam pengujian triaksial pada tanah kohesif yang tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase (UU) dengan memberikan tekanan cairan secara merata ke semua arah di dalam sel triaksial. Selama proses pengujian, hindari aliran air masuk atau keluar dari sampel uji (Badan Standar Nasional Indonesia, 2015). Standar ini menjelaskan prinsip-prinsip pengujian sampel menggunakan sel triaksial sebagai berikut.

1. Mengukur total tegangan yang melibatkan penjumlahan tegangan efektif dan tekanan air pori (dengan menggunakan laju regangan rendah).
2. Menentukan kekuatan geser serta mengidentifikasi hubungan antara tegangan dan regangan.

2.2.3.5 Uji Geser Langsung

Menurut (ASTM D-3080, 2004), uji geser langsung bertujuan untuk memperoleh besarnya tahanan geser tanah pada tegangan normal tertentu. Tujuan dari uji ini adalah untuk mendapatkan nilai kuat geser tanah. Manfaat dari hasil uji geser langsung yaitu digunakan untuk menganalisis kestabilan dalam bidang geoteknik, diantaranya yaitu analisis kestabilan lereng, daya dukung pondasi, analisis dinding penahan tanah, dan lain-lain.

2.2.4 Muka Air Tanah (MAT)

Menurut buku (Sosrodarsono & Takeda, 2003), muka air tanah adalah permukaan dimana tekanan zat cair dalam pori-pori dari sebuah media adalah sama dengan tekanan atmosfer. Pengamatan muka air tanah perlu direncanakan dengan baik sehingga diperoleh profil muka air tanah yang akurat.

Banyak kasus kelongsoran lereng tanah dan batuan disebabkan oleh faktor air, baik air di permukaan maupun aliran air di dalam tanah. Adanya air di dalam lereng menyebabkan menurunnya tegangan efektif akibat tekanan air pori yang meningkat sehingga menyebabkan turunnya kekuatan geser tanah atau massa batuan. Adanya air tanah dapat juga menambah gaya-gaya yang menyebabkan ketidakstabilan karena bertambahnya berat tanah atau massa batuan maupun timbulnya gaya yang diakibatkan oleh aliran air di dalam lereng. Kondisi

permukaan air tanah sangat tergantung pada faktor geoteknik, hidrologi, dan hidrogeologi termasuk kondisi permeabilitas tanah, geologi, profil asli permukaan air tanah, intensitas dan durasi hujan, kecepatan masuknya air permukaan, kecepatan evapotranspirasi, kecepatan pembuangan air limbah maupun aliran air dari daerah sekitarnya (SNI 8460, 2017).

2.3 Tanah Timbunan

Timbunan dapat dibedakan menjadi dua jenis sesuai dengan tujuan penggunaannya:

1. Timbunan Biasa

Timbunan ini digunakan untuk mencapai elevasi akhir *subgrade* sesuai dengan gambar perencanaan tanpa tujuan khusus lain. Timbunan biasa juga diterapkan untuk menggantikan material eksisting pada *subgrade* yang tidak memenuhi syarat.

2. Timbunan Pilihan

Timbunan ini digunakan untuk mencapai elevasi akhir *subgrade* sesuai dengan gambar perencanaan, dengan tujuan khusus lain, seperti mengurangi tebal lapisan pondasi bawah atau untuk mengurangi gaya lateral tekanan tanah di belakang dinding penahan tanah timbunan jalan.

2.3.1 Preloading

Salah satu cara yang sering digunakan untuk menangani masalah pada tanah lunak adalah dengan menggunakan metode pembebanan awal (*preloading*) yang merupakan cara untuk memperbaiki tanah dengan menambahkan beban di area di mana konstruksi permanen akan dibangun. Tujuannya adalah untuk mencapai proses konsolidasi yang diinginkan, yang berarti mencapai penurunan primer (*primary settlement*). Selama proses konsolidasi berlangsung, kekuatan geser tanah juga meningkat, sehingga dapat memungkinkan penambahan beban (Craig, 2004).

2.4 Stabilitas Lereng

2.4.1 Pengertian Umum

Menurut (Hardiyatmo, 2002), biasanya dalam analisis kestabilan lereng mengikuti prinsip dasar teori keseimbangan plastis batas. Tujuan dari evaluasi ini

adalah untuk menentukan tingkat keamanan suatu lereng terhadap kemungkinan terjadinya longsor. Menurut (Turangan & Sompie, 2014) ada tiga jenis macam lereng yaitu sebagai berikut.

1. Lereng alam yaitu lereng yang terjadi akibat proses alamiah, seperti lereng pada perbukitan.
2. Lereng yang dibuat pada tanah asli misalnya bilamana tanah dipotong untuk pembuatan jalan atau saluran air irigasi.
3. Lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan misalnya tanggul atau bendungan urugan tanah atau disebut dengan lereng timbunan (*embankment*).

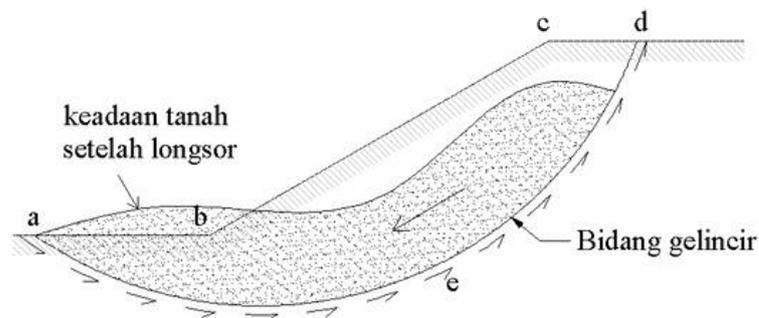
2.4.2 Lereng Timbunan

Pada penelitian ini akan membahas mengenai lereng timbunan atau biasa disebut juga dengan *embankment*. Menurut (SNI 8460, 2017), lereng timbunan umumnya digunakan untuk badan jalan raya, jalan kereta api, dan bendungan tanah. Sifat teknis lereng timbunan dipengaruhi oleh jenis tanah, cara penimbunan dan derajat kepadatan tanah. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakstabilan pada lereng timbunan yaitu sebagai berikut.

1. Terjadinya *overstressing* pada pondasi timbunan tanah kohesif setelah masa konstruksi. Biasanya pada lereng timbunan, stabilitas jangka pendek pada tanah kohesif lunak lebih penting daripada stabilitas jangka panjang, karena pondasi timbunan mendapatkan kekuatan yang merupakan hasil disipasi air pori. Perlu pemeriksaan stabilitas pada beberapa kondisi tekanan air pori.
2. Penurunan muka air cepat dan erosi buluh. Pada timbunan bendungan, penurunan muka air cepat menyebabkan meningkatnya beban efektif timbunan tanah yang dapat menyebabkan ketidakstabilan. Penyebab lain dari ketidakstabilan lereng timbunan adalah erosi bawah permukaan atau erosi buluh.
3. Gaya-gaya dinamis yaitu getaran dapat dipicu oleh gempa bumi, peledakan, pemancangan tiang, dan lainnya.

Stabilitas lereng bergantung pada dua jenis gaya yang berinteraksi pada bidang gelincir. Gaya penahan mencegah terjadinya longsor, sedangkan gaya

pendorong menyebabkan terjadinya longsor (Mingsi & Eko, 2019). Gambar 2.2 menyajikan kelongsoran pada lereng.



Gambar 2.2 Kelongsoran pada Lereng

2.4.3 Cara untuk Menstabilkan Lereng

Menurut (Turangan & Sompie, 2014) ada beberapa cara untuk menstabilkan lereng yaitu sebagai berikut.

1. Membuat lereng lebih datar atau mengurangi sudut kemiringan dari lereng.
2. Memperkecil ketinggian lereng.
3. Merubah lereng menjadi *multi slope*.
4. Dengan menambah *counter weight* yaitu tanah timbunan pada kaki lereng.

2.4.4 Kriteria Desain Perancangan Timbunan

2.4.4.1 Syarat Timbunan

Menurut (SNI 8460, 2017) beban total prapembebanan atau berupa tanah timbunan yang diaplikasikan ke tanah asli yaitu harus memenuhi kondisi sebagai berikut.

1. Lebih besar atau sama dengan 1,3 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan bila efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses prapembebanan berlangsung tidak diperhitungkan.
2. Lebih besar atau sama dengan 1,2 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan bila efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses prapembebanan berlangsung diperhitungkan.

Berikut adalah Persamaan (2.2) untuk menghitung *load ratio* dapat dilihat dibawah ini.

$$Load\ ratio = \frac{Beban\ preloading}{Beban\ masa\ operasional} \quad (2.2)$$

2.4.4.2 Data Pembebanan

Dalam penelitian ini beban yang bekerja pada timbunan yaitu beban lalu lintas, perkerasan jalan serta beban gempa.

1. Data Beban Lalu Lintas dan Beban di Luar Jalan

Menurut Peraturan dari Menteri PUPR (Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat) Nomor 05/PRT/M/201. Berikut merupakan tabel dalam penentuan kelas jalan berdasarkan fungsi dan intensitas dapat dilihat Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beban Lalu Lintas dan Beban di Luar Jalan

| Kelas Jalan | Beban Lalu Lintas (kN/m ²) | Beban di Luar Jalan (kN/m ²) |
|-------------|---|---|
| I | 15 | 10 |
| II | 12 | 10 |
| III | 12 | 10 |

Sumber: (SNI 8460, 2017)

2. Beban Perkerasan Jalan

Dalam menentukan berat isi untuk perhitungan beban perkerasan jalan yaitu dapat mengacu pada Pedoman Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Bidang Pekerjaan Umum dari (Badan Penelitian dan Pengembangan Pekerjaan Umum, 2012). Berikut Tabel 2.2 menyajikan berat isi agregat dan Tabel 2.3 menyajikan berat isi campuran yang dapat dilihat dibawah ini.

Tabel 2.2 Berat Isi Agregat

| No. | Nama Bahan | Berat Isi Padat (BIP) (t/m ³) | | Berat Isi Lepas (BIL) (t/m ³) | |
|-----|--|---|-------|---|-------|
| | | Min | Maks | Min | Maks |
| 1 | W.B Macadam (5/7). Agregat Kelas C | 1,740 | 1,920 | 1,582 | 1,699 |
| 2 | Batu belah (gunung/kali) | 1,200 | 1,600 | 0,914 | 0,960 |
| 3 | Batu kali | 1,200 | 1,700 | 0,950 | 0,971 |
| 4 | Abu batu hasil pemecah batu | 1,400 | 1,900 | 1,261 | 1,624 |
| 5 | <i>Chip</i> (lolos $\frac{3}{4}$ tertahan No. 4) | 1,220 | 1,300 | 1,109 | 1,150 |
| 6 | <i>Chip</i> (lolos No.4 tertahan No.8) | 1,430 | 1,500 | 1,300 | 1,327 |
| 7 | <i>Gravel/Sirtu</i> dipecah dengan pemecah batu | 1,620 | 1,950 | 1,373 | 1,473 |
| 8 | Agregat halus, hasil pemecah batu | 1,380 | 1,540 | 1,254 | 1,363 |
| 9 | Agregat kasar, hasil pemecah batu/ <i>split/screen</i> | 1,320 | 1,450 | 1,200 | 1,283 |
| 10 | Agregat Kelas A, Kelas S | 1,740 | 1,850 | 1,303 | 1,582 |
| 11 | Agregat Kelas B | 1,760 | 1,880 | 1,324 | 1,600 |
| 12 | Sirtu | 1,620 | 2,050 | 1,444 | 1,473 |
| 13 | <i>Split, screen</i> hasil pemecah batu | 1,400 | 1,750 | 1,232 | 1,273 |
| 14 | Pasir pasang, kasar | 1,380 | 1,540 | 1,243 | 1,316 |
| 15 | Pasir urug | 1,300 | 1,600 | 1,040 | 1,151 |
| 16 | Agregat ringan | 1,300 | 1,500 | 0,600 | 0,750 |
| 17 | Tanah biasa | 1,350 | 1,650 | 1,000 | 1,200 |
| 18 | Tanah gambut | 0,850 | 1,150 | 0,600 | 0,850 |

Sumber: (Badan Penelitian dan Pengembangan Pekerjaan Umum, 2012)

Tabel 2.3 Berat Isi Campuran

| No. | Nama Bahan | Berat Isi Padat (BIP) (t/m ³) | | Kadar Aspal (%) | |
|-----|---|---|-------|--------------------|------|
| | | Min | Maks | Min | Maks |
| 1 | AC Base | 2,300 | 2,320 | 5,00 | 5,90 |
| 2 | AC-BC | 2,300 | 2,340 | 5,30 | 6,30 |
| 3 | AC-WC | 2,270 | 2,350 | 5,40 | 6,60 |
| 4 | SMA | 2,240 | 2,310 | 5,50 | 6,40 |
| 5 | HRS-Base | 2,170 | 2,290 | 5,36 | 6,59 |
| 6 | HRS-WC | 2,170 | 2,290 | 5,96 | 6,52 |
| 7 | Lasbutag dan Latasbusir | 2,140 | 2,340 | 5,30 | 6,20 |
| 8 | Latasir A | 2,160 | 2,250 | 6,60 | 7,30 |
| 9 | Latasir B | 2,160 | 2,220 | 6,10 | 6,84 |
| 10 | Campuran dingin (OGEM, DGEM) | 2,150 | 2,220 | 5,60 | 6,30 |
| 11 | Lapen (Lapis Penetrasi Macadam) | 1,650 | 1,900 | - | - |
| 12 | WBMA/DBMA | 1,740 | 1,920 | - | - |
| 13 | LPMA (Lapis Penetrasi Macadam Asbuton) | 2,120 | 2,330 | 5,30 | 6,30 |
| 14 | CTB, CTSB, Soil Semen, RCC | 2,140 | 2,310 | - | - |
| 15 | Cement Treated Recycled Base (CTRB) | 2,065 | 2,112 | - | - |
| 16 | Cold Mix Recycled Foam Bitumen (CMRFB) | 2,081 | 2,153 | 4,95 | 5,30 |

Sumber: (Badan Penelitian dan Pengembangan Pekerjaan Umum, 2012)

3. Beban Gempa

Sesuai dengan standar SNI, analisis terhadap dampak gempa pada timbunan dapat dilakukan menggunakan pendekatan keseimbangan batas, dimana gaya

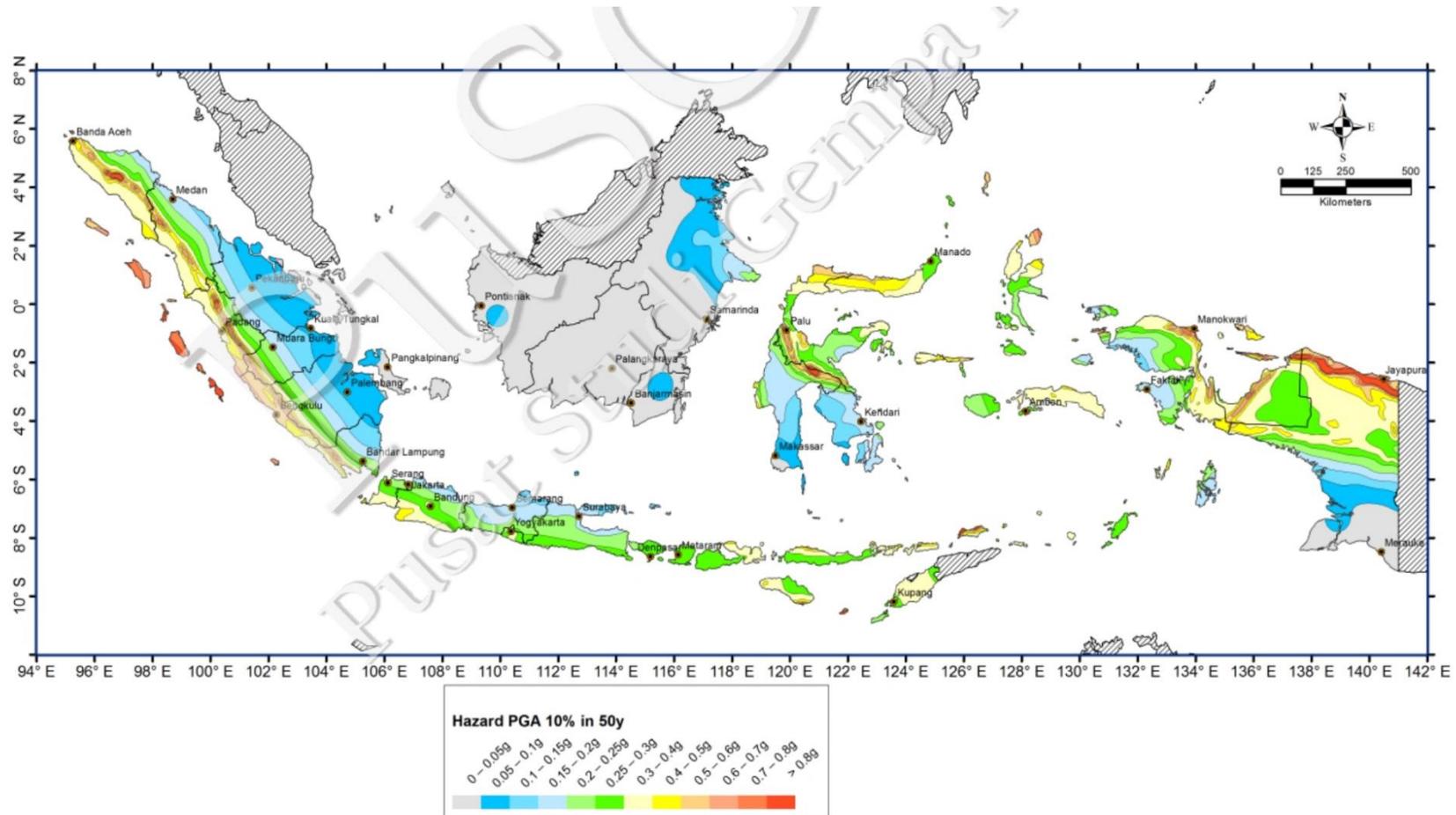
gempa direpresentasikan melalui model pseudostatik. Penggunaan koefisien seismik dalam analisis ini mengikuti percepatan di permukaan (PSA) dengan memperhatikan faktor keamanan minimal terhadap gempa, yaitu $FK = 1,10$. Selanjutnya, koefisien seismik horizontal (k_h) ditetapkan sebesar 0,5 PSA.

Informasi mengenai percepatan gempa diperoleh dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017) dan SNI 1726:2019 beban gempa untuk lereng galian dan timbunan direncanakan dibangun dengan kriteria kepentingan strategis yaitu tidak boleh mengalami terputusnya lajur transportasi setelah terjadinya gempa rencana. Gempa rencana untuk lereng galian dan timbunan ditetapkan selama umur rencana 50 tahun adalah 10% atau setara dengan periode ulang gempa selama 500 tahun. Peta yang mencakup periode ulang gempa selama 500 tahun dapat dirujuk pada ilustrasi yang disajikan dalam Gambar 2.3. Berikut Persamaan (2.3) untuk menghitung umur rencana.

$$\bar{R} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (2.3)$$

Dimana

| | | |
|-----------|---|--|
| \bar{R} | = | Probabilitas terjadinya gempa dalam n tahun |
| T | = | Periode ulang gempa (<i>return period</i>) dalam tahun |
| n | = | Umur rencana (tahun) |



Gambar 2.3 Peta Zona Gempa Indonesia Periode Ulang 500 Tahun

Sumber: (Pustlitbang PUPR, 2017)

Dalam menentukan beban gempa dibutuhkan mengenai klasifikasi situs tanah. Dimana klasifikasi situs menurut (SNI 1726, 2019) yaitu memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Dalam menetapkan kriteria desain seismik untuk sebuah bangunan di permukaan tanah atau menentukan amplifikasi percepatan gempa puncak dari batuan dasar hingga permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Berikut mengenai klasifikasi situs berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas.

Tabel 2.4 Klasifikasi Situs

| Kelas Situs | \bar{v}_s (m/detik) | \bar{N} atau \bar{N}_{ch} | \bar{s}_u (kPa) |
|---|-----------------------|-------------------------------|-------------------|
| SA (batuan keras) | < 1500 | N/A | N/A |
| SB (batuan) | 750 sampai 1500 | N/A | N/A |
| SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak) | 350 sampai 750 | > 50 | ≥ 100 |
| SD (tanah sedang) | 175 sampai 350 | 15 sampai 50 | 50 sampai 100 |
| SE (tanah lunak) | < 175 | < 15 | < 50 |

Sumber: (SNI 1726, 2019)

Dalam penentuan klasifikasi situs dapat menggunakan nilai tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata (\bar{N}) yaitu dengan Persamaan (2.4).

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (2.4)$$

Dimana:

$$\sum_{i=1}^n d_i = \text{Ketebalan total dari lapisan tanah 30 m lapisan paling atas}$$

$$N_i = \text{Tahanan penetrasi standar}$$

Analisis beban gempa pada timbunan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.5).

$$PSA = F_{PGA} \times PGA \quad (2.5)$$

Dimana :

PSA = Percepatan permukaan puncak disesuaikan dengan klasifikasi lokasi

F_{PGA} = Akselerasi tanah puncak (batuan dasar) berdasarkan F_{PGA}

PGA = Koefisien situs seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5

Berikut Tabel 2.5 menyajikan koefisien situs yaitu dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.5 Koefisien Situs (F_{PGA})

| Kelas Situs | PGA ≤ 0,1 | PGA = 0,2 | PGA = 0,3 | PGA = 0,4 | PGA = 0,5 | PGA ≤ 0,6 |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SA | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SB | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| SC | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| SD | 1,6 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,1 |
| SE | 2,4 | 1,9 | 1,6 | 1,4 | 1,3 | 1,1 |
| SF | SS ^(a) | | | | | |

Sumber: (SNI 1726, 2019)

2.4.4.3 Kriteria *Loading* dan *Unloading* (*Stress History*)

Menurut (SNI 8460, 2017), perancangan lereng timbunan harus memperhitungkan tegangan vertikal sebagai major *principal stress* pada saat kondisi pemberian beban yang disebut dengan *loading*, sedangkan pada lereng galian harus memperhitungkan tegangan horizontal sebagai major *principal stress* pada saat kondisi pelepasan beban disebut dengan *unloading*. Pada kondisi jangka panjang sebagai respon pengurangan tekanan pori dan menurunnya kekuatan geser tanah menjadikan kondisi ini kritis untuk dianalisis.

2.4.4.4 Kriteria Faktor Keamanan (FK)

Faktor keamanan stabilitas merupakan batasan aman yang diizinkan dalam merencanakan lereng perkuatan (Sari et al., 2024). Stabilitas lereng ini merupakan tahap yang paling penting dalam proses stabilisasi untuk lereng dengan skala yang berbeda, dan ditentukan oleh nilai FK (Nanehkar et al., 2022). Berikut Tabel 2.6 menyajikan kriteria analisis stabilitas timbunan.

Tabel 2.6 Kriteria Desain Analisis Stabilitas Timbunan

| Kondisi | Jenis beban | Syarat | Sumber |
|-------------------|------------------------|-------------|---|
| <i>Short term</i> | Beban timbunan | $FK > 1,40$ | Kelas Jalan I: Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi dari (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002) |
| | Beban perkerasan jalan | $FK > 1,50$ | (SNI 8460, 2017) |
| <i>Long term</i> | Beban lalu lintas | $FK > 1,50$ | (SNI 8460, 2017) |
| | Beban gempa | $FK > 1,10$ | (SNI 8460, 2017) |

2.4.5 Analisis Stabilitas Timbunan

Menurut (SNI 8460, 2017), analisis stabilitas lereng tanah pada biasanya dilakukan berdasarkan pendekatan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method / FEM*) dan Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method / LEM*). Pada metode numerik seperti metode FEM memungkinkan pemodelan yang lebih kompleks dan rinci, termasuk tahapan konstruksi. Sedangkan pada pendekatan LEM biasanya dimodelkan pelapisan tanah yang sederhana dan tidak dapat menampilkan tahapan konstruksi. Kedua pendekatan ini menghasilkan faktor keamanan yang berbeda karena pendekatan yang berbeda dalam menghitung stabilitas lereng. Pada FEM sering menggunakan pengurangan kuat geser, sementara pada metode LEM mempertimbangkan perbandingan gaya-gaya yang menahan lereng dengan gaya-gaya yang bekerja padanya.

Stabilitas lereng dapat dievaluasi dengan 4 (empat) kondisi perancangan atau kondisi pembebanan disesuaikan dengan kondisi yang dapat terjadi di lapangan yaitu sebagai berikut.

1. Kondisi pada saat konstruksi dan pada akhir konstruksi
2. Kondisi *steady state seepage*
3. Kondisi *sudden drawdown*
4. Kondisi gempa (*earthquake*)

2.4.5.1 Analisis Kegagalan Melingkar di Permukaan Lereng

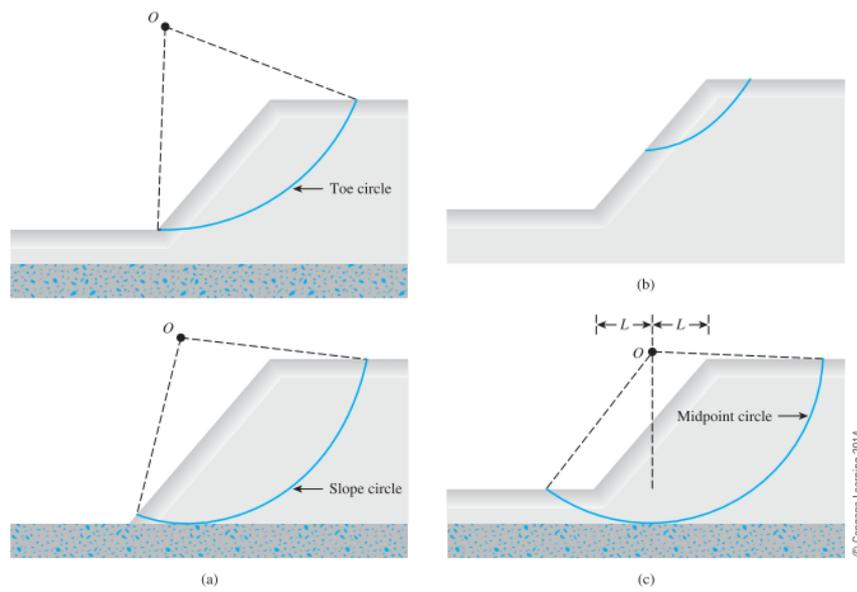
Menurut (Das & Sobhan, 2014) ada dua jenis dalam menganalisis keruntuhan pada lereng yaitu sebagai berikut.

1. Melihat massa tanah, dimana massa tanah diatas permukaan longsor diambil sebagai satuan. Jenis analisis ini memudahkan jika tanah yang membentuk lereng dianggap homogen.
2. Metode irisan, dimana analisis ini lereng dibagi menjadi beberapa irisan paralel vertikal. Perhitungan stabilitas lereng dari setiap irisan dihitung secara terpisah, sehingga dapat mempertimbangkan ketidakhomogenan tanah dan tekanan air pori. Hal ini juga menjelaskan variasi tegangan normal sepanjang keruntuhan dipermukaan.

Keruntuhan yang terjadi pada lereng dapat terjadi disalah satu Gambar 2.4. Dalam menentukan bentuk keruntuhan lereng, dapat ditentukan dengan sudut kemiringan lerengnya. Mengacu pada Gambar 2.5 ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu sebagai berikut.

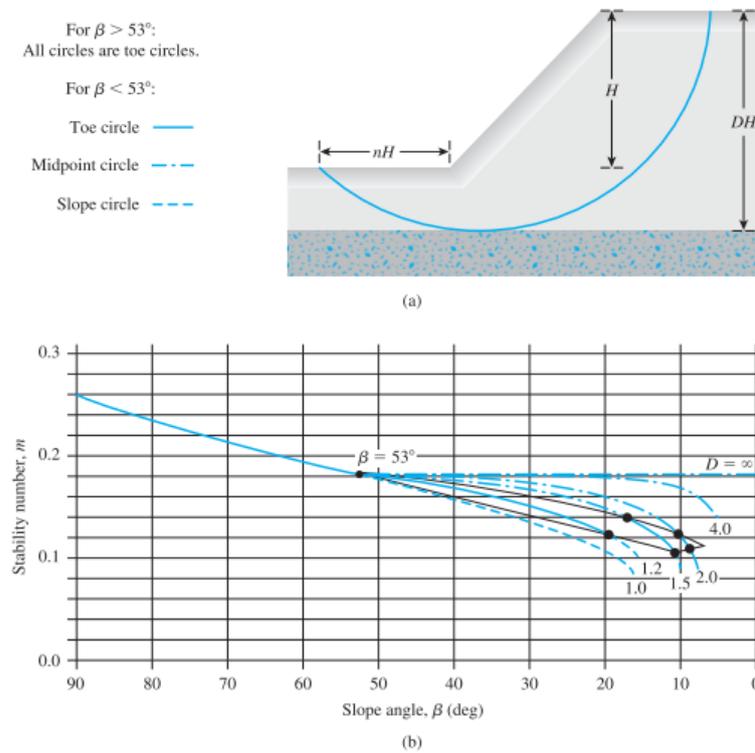
1. Jika sudut kemiringan β lebih dari 53° lingkaran kritis selalu berupa lingkaran kaki.
2. Jika sudut kemiringan β kurang dari 53° lingkaran kritis berupa lingkaran kaki, lereng, atau titik tengah, dan bergantung pada lokasi alas kokoh dibawah lereng. Berikut Persamaan (2.6) untuk menentukan fungsi kedalaman yang didefinisikan sebagai berikut.

$$D = \frac{\text{Jarak vertikal dari puncak lereng ke dasar}}{\text{Ketinggian lereng}} \quad (2.6)$$



Gambar 2.4 Bentuk Keruntuhan Lereng: (a) *Slope Failure*; (b) *Shallow Slope Failure*; (c) *Base Failure*

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)



Gambar 2.5 (a) Definisi Parameter Jenis Keruntuhan Lingkaran Titik Tengah; (b) Plot Bilangan Kestabilan terhadap Sudut Kemiringan

Sumber: (Terzaghi dan Peck, 1967)

$$N_i = W_i \cos \theta_i - u_i a_i \quad (2.7)$$

Dalam mencari FK yaitu dapat menggunakan persamaan yang dapat dilihat pada Persamaan (2.8).

$$FK = \frac{\text{Jumlah momen dari tahanan geser sepanjang bidang longsor}}{\text{Jumlah momen dari berat massa tanah yang longsor}}$$

$$FK = \frac{\sum M_r}{\sum M_d} \quad (2.8)$$

Berikut merupakan Persamaan (2.9) untuk mencari berat massa tanah dari setiap irisan $R \sin \theta$.

$$\sum M_d = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i \quad (2.9)$$

Dimana:

r = Jari-jari lingkaran

n = Total irisan

W_i = Berat massa tanah irisan ke- i

θ_i = Sudut yang dapat didefinisikan pada Gambar 2.6 (°)

Berikut merupakan Persamaan (2.10) untuk mencari momen yang menahan tanah akan longsor.

$$\sum M_r = R \sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i \tan \varphi) \quad (2.10)$$

Sehingga didapatkan Persamaan (2.11) untuk mencari Faktor Keamanan (FK) yaitu sebagai berikut:

$$FK = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i \tan \varphi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (2.11)$$

Jika ada air pori dalam lereng, tekanan air pori di bidang longsor tidak akan menambah momen yang disebabkan oleh tanah yang akan longsor (M_d), karena gaya hasil dari tekanan air pori akan melalui titik pusat lingkaran. Dengan

mengganti Persamaan (2.7) ke dalam Persamaan (2.11), mendapatkan hasil Persamaan (2.12).

$$FK = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (W_i \cos \theta_i - u_i a_i) \tan \varphi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (2.12)$$

Dimana:

| | | |
|-----------|---|--|
| FK | = | Faktor Keamanan |
| c | = | Kohesi tanah (kN/m ²) |
| φ | = | Sudut gesek yang terjadi didalam tanah (°) |
| a_i | = | Panjang lengkungan lingkaran pada irisan ke- i (m) |
| u_i | = | Tekanan air pori yang terjadi pada tanah diirisan ke- i (kN/m ²) |

2.5 Kapasitas Daya Dukung

Kapasitas daya dukung adalah kemampuan daya dukung kapasitas tanah untuk menopang beban konstruksi yang bekerja. Dalam memperoleh tegangan tanah yang dapat diterima, beban diperhitungkan dengan membaginya dengan nilai FK. Fungsi nilai FK adalah untuk memastikan bahwa tanah memiliki ketahanan yang cukup, sehingga tidak terjadi keruntuhan geser atau penurunan berlebihan.

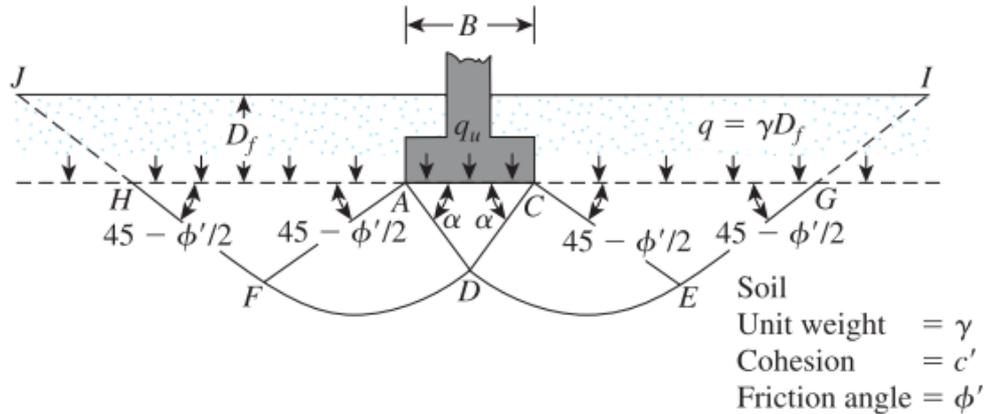
Daya dukung tanah dinyatakan dalam bentuk tegangan, yang dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.13).

$$q_{all} = \frac{\text{Daya dukung batas } (q_{ult})}{\text{Faktor Keamanan } (FK)} \quad (2.13)$$

Nilai FK diterapkan untuk memastikan bahwa tanah tidak mengalami keruntuhan geser atau penurunan berlebihan. Agar memenuhi standar keamanan, disarankan untuk menggunakan nilai FK sebesar 1,5.

Terdapat beberapa metode yang dapat dipakai untuk menghitung daya dukung tanah dan salah satu metode yang umum digunakan adalah metode Terzaghi. Menurut (Hardiyatmo, 2002) metode ini merujuk pada prinsip *shear failure*, penerapan metode ini memungkinkan perolehan hasil yang akurat dan dapat

dijadikan dasar dalam perancangan pondasi bangunan. Berikut adalah bentuk keruntuhan dalam menganalisis daya dukung tanah dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Bentuk Keruntuhan dalam Menganalisis Daya Dukung Tanah

Sumber: (Das, 2002)

Dari gambar diatas didapat persamaan untuk menghitung daya dukung tanah menggunakan Persamaan (2.14).

$$q_{ult} = c N_c + D_f \gamma N_q + 0,5 \gamma B N_\gamma \quad (2.14)$$

Dimana

q_{ult} = Daya dukung *ultimate*

c = Kohesi tanah (kN/m^2)

D_f = Kedalaman pondasi

B = Lebar pondasi

Berikut adalah tabel untuk menentukan faktor daya dukung tanah dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Nilai Faktor Daya Dukung Tanah Terzaghi

| ϕ ($^\circ$) | Keruntuhan Geser Umum | | |
|------------------------|-----------------------|-------|------------|
| | N_c | N_q | N_γ |
| 0 | 5,14 | 1,00 | 0,00 |
| 5 | 6,49 | 1,57 | 0,45 |

| ϕ (°) | Keruntuhan Geser Umum | | |
|---------------|-----------------------|--------|------------|
| | Nc | Nq | N γ |
| 10 | 8,35 | 2,47 | 1,22 |
| 15 | 10,98 | 3,94 | 2,65 |
| 20 | 14,83 | 6,40 | 5,39 |
| 25 | 20,27 | 10,66 | 10,88 |
| 30 | 30,14 | 18,40 | 22,40 |
| 35 | 46,12 | 33,30 | 48,03 |
| 40 | 75,12 | 64,20 | 109,41 |
| 45 | 133,88 | 134,88 | 271,76 |
| 50 | 266,89 | 319,07 | 762,89 |

Sumber: (Das et al., 1995)

2.6 Konsolidasi Tanah

Konsolidasi tanah dasar yaitu keluarnya air atau udara yang disebabkan oleh pembebanan di atas permukaan tanah. Dalam situasi ini, penurunan terjadi akibat beban yang diberikan pada lapisan tanah dasar yang dikenal sebagai proses konsolidasi. Secara umum, proses konsolidasi cenderung terjadi dalam satu arah (*one dimensional consolidation*), yang berarti terjadi secara vertikal. Hal ini disebabkan oleh ketidakmampuan lapisan yang menerima tambahan beban untuk bergerak secara horizontal, karena tertahan oleh tekanan lateral dari tanah di sekitarnya (Gati, B. M., & Purwanto, 2018).

Berdasarkan sejarah pembebanannya, tanah dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori sebagai berikut:

1. Tanah terkonsolidasi normal (*Normally Consolidated / NC*) yaitu kondisi di mana tekanan puncak maksimum yang pernah dialami oleh tanah setara dengan beban sendiri yang diakibatkan oleh gravitasi saat ini.
2. Tanah terkonsolidasi berlebih (*Over Consolidated / OC*) yaitu menggambarkan kondisi dimana tekanan puncak maksimum yang pernah diterapkan pada tanah lebih kecil daripada tekanan yang dihasilkan oleh berat sendiri tanah saat ini.

3. Tanah sedang berkonsolidasi (*Under Consolidated* / UC) tanah yang masih dalam proses konsolidasi.

Klasifikasi sejarah pembebanan tanah ini dinyatakan melalui nilai *Over Consolidation Ratio* (OCR). Berikut Persamaan (2.15) yang digunakan untuk mencari OCR.

$$\text{OCR} = \frac{pc'}{po'} \quad (2.15)$$

Dimana:

pc' = Tegangan prakonsolidasi

po' = Tegangan vertikal efektif

Jika tanah *Normally Consolidated* mempunyai nilai OCR = 1, jika tanah *Over Consolidated* mempunyai nilai OCR > 1, dan untuk tanah *Under Consolidated* memiliki nilai OCR < 1.

2.6.1 Penurunan Konsolidasi

Persamaan (2.16), (2.17), dan (2.18) digunakan untuk menghitung besarnya penurunan konsolidasi berdasarkan sejarahnya.

1. Persamaan untuk tanah *Normally Consolidated*, yaitu:

$$S_c = c_c \times \frac{H}{1+e_o} \times \left(\frac{po'+\Delta p'}{pc'} \right) \quad (2.16)$$

2. Persamaan untuk tanah *Over Consolidated*, yaitu:

Jika, $(po' + \Delta p) \leq pc'$ maka persamaan:

$$S_c = \frac{c_s \times H}{1+e_o} \times \log \left(\frac{po'+\Delta p'}{po'} \right) \quad (2.17)$$

3. Sedangkan jika, $(po' + \Delta p') > pc'$ maka persamaan:

$$S_c = \frac{c_s \times H}{1+e_o} \times \log \left(\frac{pc'}{po'} \right) + \frac{c_c \times H}{1+e_o} \times \log \left(\frac{po'+\Delta p'}{pc'} \right) \quad (2.18)$$

Dimana:

H = Tinggi (m)

S_c = Penurunan konsolidasi (m)

| | | |
|------------|---|--|
| c_c | = | Indeks kompresi |
| c_s | = | Indeks pengembangan |
| e_o | = | Angka pori awal |
| Δp | = | Distribusi tegangan (kN/m ²) |

2.6.2 Waktu Konsolidasi

Estimasi laju penurunan konsolidasi umumnya diperlukan untuk memahami seberapa cepat tanah mengalami penurunan selama proses konsolidasi. Hal ini menjadi pertimbangan penting terutama ketika penurunan diperkirakan signifikan. Jika penurunan yang terjadi sangat kecil, maka perhitungan kecepatan penurunan mungkin tidak perlu diperhitungkan karena penurunan tersebut sejalan dengan waktu dan tidak menimbulkan perbedaan yang signifikan.

Menurut teori Terzaghi (1925) memperkenalkan teori pertama kali untuk menghitung laju konsolidasi satu dimensi pada tanah lempung yang sudah jenuh air (Das, 1995). Asumsi-asumsi yang diterapkan dalam perhitungan yaitu sebagai berikut.

1. Kehomogenan campuran lempung dan air
2. Tanah sepenuhnya jenuh air
3. Kemampuan kompresi air
4. Kemampumampatan kompresi butiran tanah
5. Aliran air terjadi hanya dalam satu arah, mengikuti arah pembebanan
6. Berlaku Prinsip Hukum Darcy

Persamaan untuk menghitung konsolidasi Terzaghi dapat menggunakan Persamaan (2.19).

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.19)$$

Dimana:

| | | |
|-------|---|-------------------------------------|
| c_v | = | Koefisien konsolidasi arah vertikal |
| u | = | Tekanan air pori |
| t | = | Waktu |

z = Koordinat arah vertikal

Berikut persamaan dalam menentukan nilai c_v dapat menggunakan Persamaan (2.20).

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (2.20)$$

Dimana:

K = Koefisien permeabilitas

m_v = Koefisien kemampumampatan volume

Berikut persamaan menurut (Sivaram & Swamee, 1977) untuk menentukan faktor waktu dan derajat konsolidasi. Persamaan (2.21) dibawah ini digunakan untuk mencari faktor waktu.

$$T_v = m_v \frac{t}{H_{dr}^2} \quad (2.21)$$

Dimana:

T_v = Faktor waktu

H_{dr} = Panjang aliran air

Dalam menghitung derajat konsolidasi yaitu berdasarkan disipasi tegangan air pori eksese, derajat konsolidasi pada jarak dan waktu, yaitu dapat dilihat pada Persamaan (2.22).

$$u_z = \frac{u_0 - u_z}{u_0} = 1 - \frac{u_z}{u_0} \quad (2.22)$$

Dimana:

u_z = Tegangan air pori eksese pada waktu t

Berikut merupakan Persamaan (2.23) dalam menentukan tingkat konsolidasi rata-rata untuk setiap kedalaman dan pada setiap waktu t .

$$U = \frac{Sc(t)}{Sc} \quad (2.23)$$

Dimana:

U = Derajat konsolidasi rata-rata

$Sc(t)$ = Penurunan konsolidasi pada waktu t

Berikut nilai pengaruh waktu terhadap tingkat konsolidasi rata-rata di atas juga dapat diestimasi menggunakan Persamaan (2.24) dan (2.25).

$$U = 0 - 52,6\%, \text{ maka } T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$U > 52,6\%, \text{ maka } T_v = 1,178 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (2.25)$$

Berikut persamaan untuk interval derajat konsolidasi 0 - 100% yaitu dapat dilihat pada Persamaan (2.26) dan (2.27).

$$\frac{U\%}{100} = \frac{\left(\frac{4T_v}{\pi} \right)^{0,5}}{\left[1 + \left(\frac{4T_v}{\pi} \right)^{2,8} \right]^{0,179}} \quad (2.26)$$

$$T_v = \frac{\left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{U\%}{100} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{U\%}{100} \right)^{5,6} \right]^{0,357}} \quad (2.27)$$

Persamaan diatas bernilai *error* pada nilai Tv kurang dari 1% pada interval $U < 0\% < 100\%$.

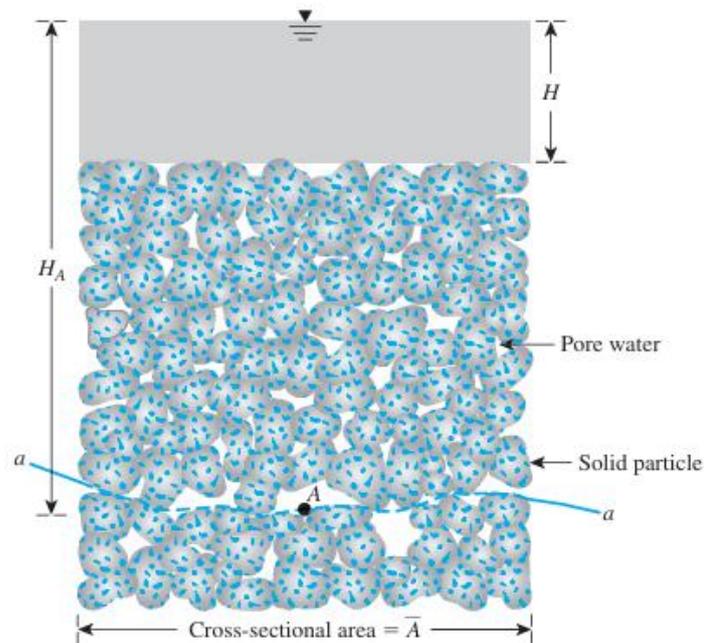
2.6.3 Tegangan Efektif

Tegangan efektif didefinisikan sebagai total komponen gaya vertikal pada titik kontak partikel per satuan luas penampang massa tanah. Gambar 2.8 menyajikan gambar tegangan efektif pada keadaan kondisi jenuh air. Berdasarkan pada Gambar 2.8 tegangan total dapat menggunakan Persamaan (2.28).

$$\sigma = H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat} \quad (2.28)$$

Dimana:

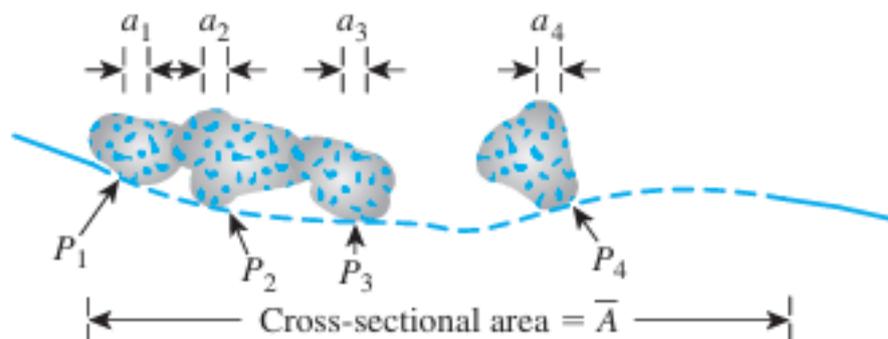
| | | |
|----------------|---|---|
| σ | = | Tegangan total pada titik A |
| γ_w | = | Berat volume air (kN/m ³) |
| H_A | = | Jarak antara titik A dan muka air |
| γ_{sat} | = | Berat isi tanah <i>saturated</i> (kN/m ³) |



Gambar 2.8 Tegangan Efektif pada Keadaan Kondisi Jenuh Air

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

Tegangan keseluruhan yang dijelaskan oleh persamaan di atas terdiri dari dua unsur utama, yakni tegangan yang diterima oleh air dan tegangan yang diterima oleh partikel tanah itu sendiri. Berikut Gambar 2.9 menyajikan gambar gaya kerja yang terjadi pada titik antar partikel tanah.



Gambar 2.9 Gaya Kerja yang Terjadi pada Titik Antar Partikel Tanah

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

Tegangan antara partikel tanah yang terjadi di sepanjang penampang A yaitu dapat menggunakan Persamaan (2.29).

$$\sigma' = \frac{P_{1(v)} + P_{2(v)} + P_{3(v)} + \dots + P_{n(v)}}{\bar{A}} \quad (2.29)$$

Dimana $P_{1(v)} + P_{2(v)} + P_{3(v)} + \dots + P_{n(v)}$ dapat diartikan sebagai komponen vertikal dari $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ serta \bar{A} merupakan luas penampang melintang massa tanah yang diperhatikan.

Apabila luas kontak antara partikel tanah dicatat sebagai a_1, a_2, a_3, a_4 , dan total luas area kontak antar partikel tanah adalah a_s . Maka luas penampang air yaitu $\bar{A} - a_s$. Oleh karena itu, tegangan total dapat dilihat pada Persamaan (2.30).

$$\sigma = \sigma' + \frac{u(A - a_s)}{\bar{A}} = \sigma' + u(1 - a'_s) \quad (2.30)$$

Dimana:

$u = H_A \gamma_w$ = Tekanan air pori yang merupakan tekanan hidrostatik di titik A

$a'_s = \frac{a_s}{\bar{A}}$ = Segmen dari unit area penampang melintang massa tanah yang berada di titik-titik kontak antara butiran

Kemudian area kontak antar partikel yang sangat kecil dapat diabaikan. Maka persamaan tegangan total dapat dilihat pada Persamaan (2.31).

$$\sigma v = \sigma' v + u \quad (2.31)$$

Variabel u dalam persamaan diatas juga bisa disebut sebagai tegangan netral. Maka persamaan diatas dapat diganti menjadi Persamaan (2.32).

$$\sigma' = [H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}] - H_A\gamma_w$$

$$\sigma' = (H_A - H)(\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$\sigma' = (\text{tinggi tanah di dalam tabung}) \times \gamma' \quad (2.32)$$

Dimana $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ merujuk pada berat isi tanah yang terendam air. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tegangan efektif di titik A tidak bergantung pada tinggi air di atas permukaan tanah yang terendam air.

Kesimpulannya, tegangan efektif merupakan gaya persatuan luas yang dipikul oleh butiran-butiran tanah. Perubahan volume dan kekuatan tanah bergantung pada tegangan efektif di dalam massa tanah. Semakin tinggi tegangan suatu tanah, semakin padat pula tanah tersebut (Das, 1995).

2.6.4 Tegangan Vertikal Akibat Beban Timbunan

Berikut Gambar 2.10 menyajikan penampang timbunan setinggi H . Dalam kondisi pembebanan dua dimensi ini, peningkatan tegangan vertikal dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.33), (2.34), (2.35), dan (2.36).

$$\Delta\sigma_z = \frac{q_o}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right] \quad (2.33)$$

$$q_o = \gamma \times H \quad (2.34)$$

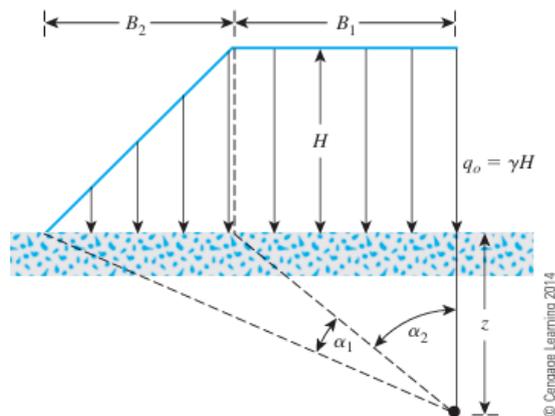
$$\alpha_1(\text{radians}) = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 + B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (2.35)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (2.36)$$

Berikut bentuk persamaan yang lebih sederhana dari Persamaan (2.33) yaitu dapat dilihat pada Persamaan (2.37).

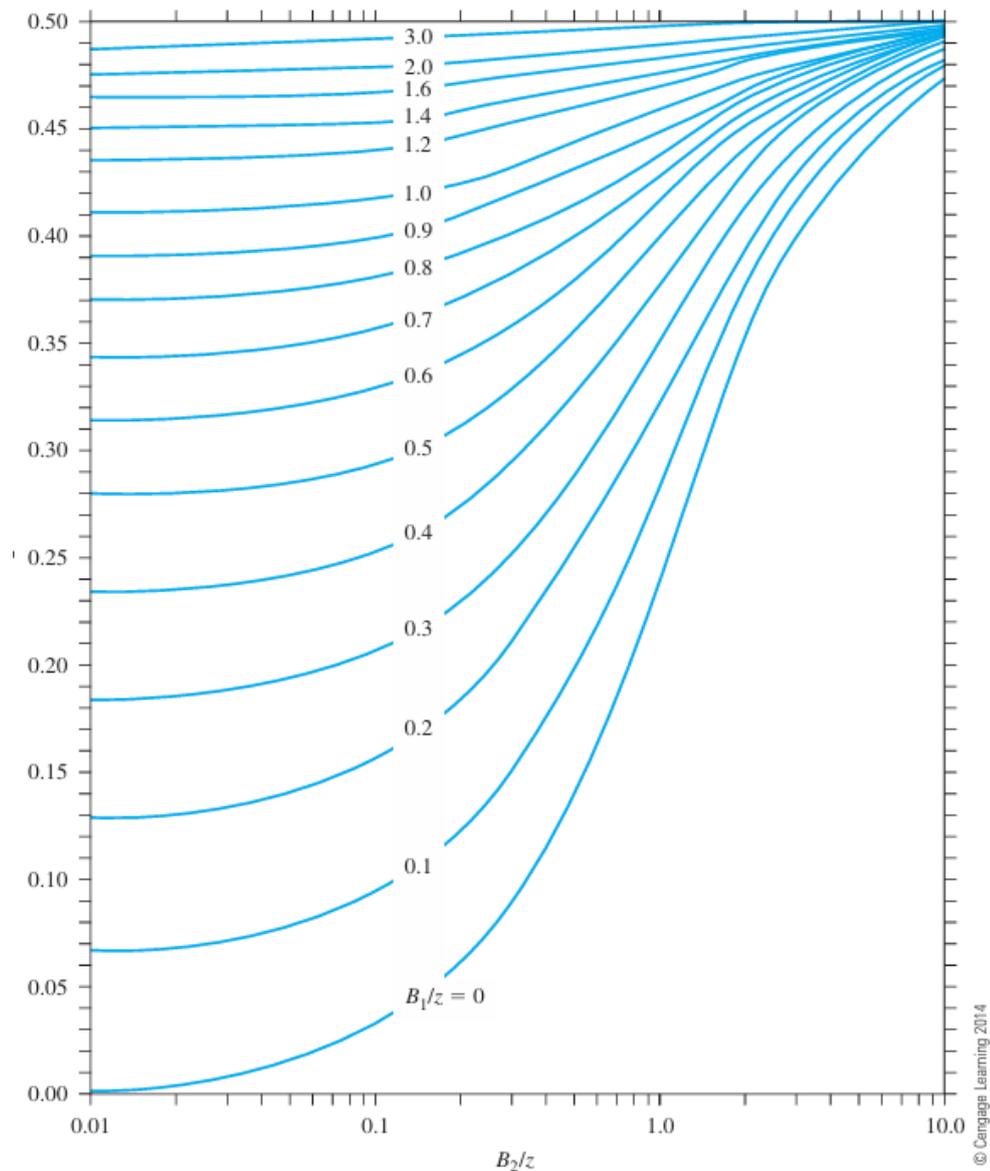
$$\Delta\sigma_z = q_o \times I_2 \quad (2.37)$$

Dimana I_2 yaitu fungsi dari B_1/z dan B_2/z . Dalam menentukan I_2 dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Beban Timbunan

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)



Gambar 2.11 Grafik *Osterberg* untuk Penentuan Tegangan Vertikal Akibat Beban Timbunan

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

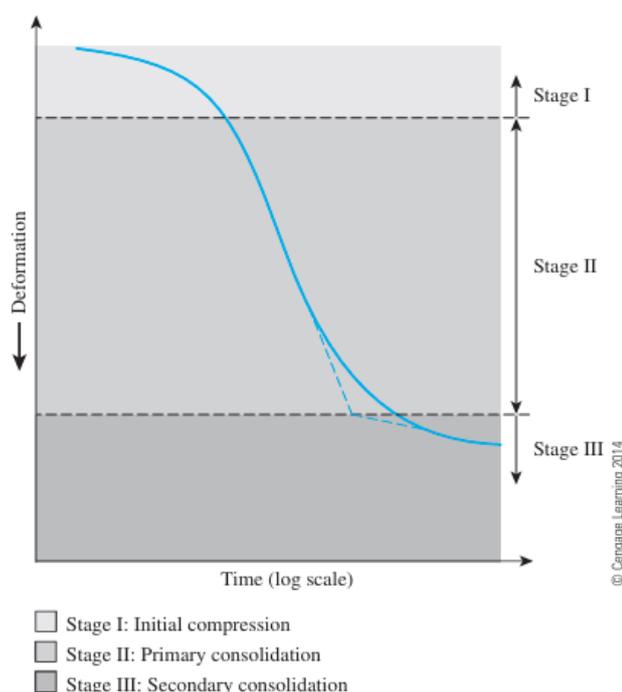
2.6.5 Penurunan Tanah

Penurunan tanah atau yang dikenal sebagai *settlement*, terjadi ketika suatu lapisan tanah mengalami regangan atau penurunan akibat beban yang terjadi. Perubahan susunan tanah dan penurunan rongga pori dalam tanah adalah faktor penyebab dari regangan yang terjadi dalam proses ini (Hardiyatmo, 2002).

Secara umum, penurunan yang disebabkan oleh pembebanan pada tanah dasar dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu sebagai berikut.

1. Penurunan Elastis (*Elastic Settlement*) adalah penurunan yang terjadi akibat deformasi elastis tanah tanpa mengalami perubahan kadar air, dan terjadi secara instan saat beban diterapkan. Penurunan ini dapat dihitung menggunakan teori elastisitas.
2. Penurunan Konsolidasi Primer (*Primary Consolidation Settlement*) yaitu penurunan ini terjadi karena perubahan volume tanah yang jenuh air sebagai akibat dari disipasi air dalam pori tanah. Besarnya penurunan ini tergantung pada waktu konsolidasi.
3. Penurunan Konsolidasi Sekunder (*Secondary Consolidation Settlement*) yaitu jenis penurunan ini terjadi setelah penurunan konsolidasi primer berhenti. Besarnya penurunan konsolidasi sekunder bergantung pada waktu serta kemiringan kurva fase konsolidasi sekunder (Hardiyatmo, 2002)

Berikut Gambar 2.12 menyajikan gambar grafik perubahan deformasi seiring waktu selama pembebanan.



Gambar 2.12 Grafik Perubahan Deformasi Seiring Waktu Selama Pembebanan

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

Berikut Tabel 2.8 menyajikan syarat penurunan total setelah operasi dan kecepatan penurunan.

Tabel 2.8 Syarat Penurunan

| Parameter | Syarat | Sumber |
|---------------------------------|----------------|--|
| Penurunan total setelah operasi | ≤ 10 cm | (<i>Manual Desain Perkerasan Jalan No. 02/M/BM/2017, 2017</i>) |
| Laju penurunan | < 2 cm/tahun | Kelas Jalan I: Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi dari (Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah, 2002) |

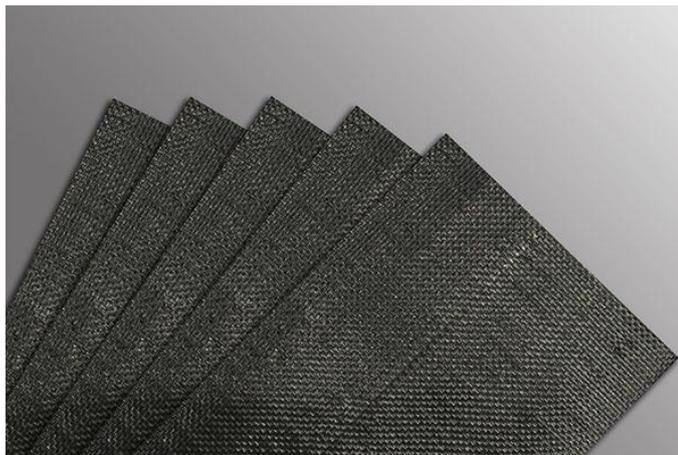
2.7 Geotekstil

2.7.1 Pendahuluan

Geotekstil merupakan bagian dari geosintetik yang terbuat dari bahan yang berupa lembaran material yang terbuat dari bahan tekstil polimer serta memiliki sifat dapat dilewati air yang digunakan untuk memperkuat tanah sehingga tanah memiliki daya dukung yang aman (Muchlisin & Roestaman, 2019). Geotekstil biasanya terbuat dari material yang kokoh dan tahan lama, serta memiliki ketahanan terhadap reaksi kimia, cuaca, dan penuaan. Aplikasi geotekstil ini yang bersifat permanen, kemampuan jangka panjang dari struktur sangat bergantung pada ketahanan dan daya tahan geotekstil. Oleh karena itu, pemilihan jenis geotekstil harus dipertimbangkan secara cermat dalam perencanaan agar sesuai dengan kondisi dan fungsi di lapangan (Pratama et al., 2021).

2.7.2 Geotekstil *Woven*

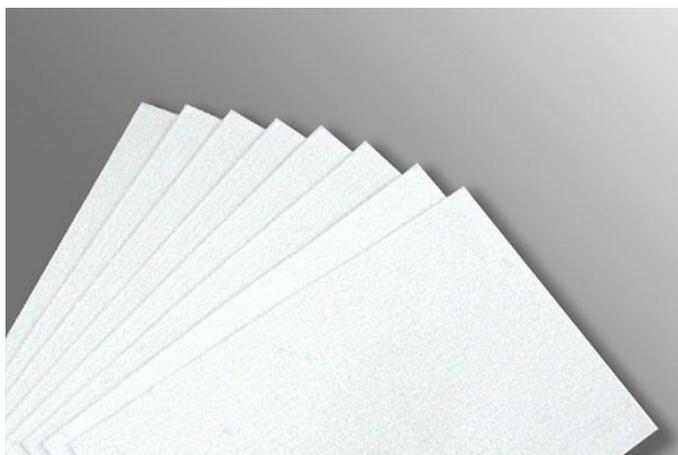
Geotekstil *woven* berperan dalam meningkatkan kestabilan tanah dasar, terutama yang lunak, karena memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada geotekstil *non-woven*. Selain itu, memiliki sifat permeabilitas air yang baik serta tahan terhadap zat kimia dan organik (Pratama et al., 2021). Keuntungan geotekstil *woven* yaitu memiliki keuntungan yang ekonomis karena memberikan kuat tarik maksimal pada berat tahan minimal sehingga untuk mendapatkan tingkat keamanan struktur mudah didapatkan (Saputra, 2017). Berikut Gambar 2.13 menyajikan contoh geotekstil *woven* dapat dilihat pada dibawah ini.



Gambar 2.13 Geotekstil Jenis *Woven*
(Sumber: PT. Teknindo Geosistem Unggul, 2022)

2.7.3 Geotekstil *Non-Woven*

Geotekstil *non-woven* merupakan material yang terbentuk secara acak tanpa pola tertentu dan sering digunakan sebagai pemisah tanah, stabilisasi tanah, dan pembagi beban. Namun, jarang digunakan untuk penguatan dinding penahan (Ndale, 1970). Berikut Gambar 2.14 menyajikan contoh geotekstil *non-woven* dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2.14 Geotekstil Jenis *Non-Woven*
(Sumber: PT. Teknindo Geosistem Unggul, 2022)

2.7.4 Sifat Geotekstil

Pemilihan geotekstil bertujuan untuk perkuatan yang dipengaruhi oleh dua faktor utama yaitu faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal mencakup

kekuatan tarik, sifat perpanjangan (*creep*), struktur, dan daya tahan terhadap lingkungan. Faktor eksternal meliputi jenis bahan timbunan yang berinteraksi langsung dengan geotekstil (Aripindi et al., 2022).

Menurut (Koerner, 2005), geotekstil memiliki sifat *elongasi*. Sifat *elongasi* adalah kemampuan material geotekstil untuk memanjang atau meregang ketika diberikan beban tarik. Berikut Tabel 2.9 menyajikan tipe konstruksi dan nilai *elongasi*.

Tabel 2.9 Tipe Konstruksi dan Nilai *Elongasi*

| Tipe Konstruksi | Nilai <i>Elongasi</i> (%) |
|-----------------------|---------------------------|
| Dinding penahan tanah | 5,00 |
| Timbunan | 6,00 |
| Dinding segmental | 7,00 – 8,00 |
| Abutmen jembatan | 10,00 |

Dalam menentukan nilai FK dapat dirumuskan berdasarkan nilai uji yang diizinkan sesuai dengan Persamaan (2.38) dan (2.39). Umumnya sebagian besar nilai uji laboratorium tidak dapat digunakan secara langsung. Namun harus dikurangi sesuai kondisi *in situ*. Hal ini dapat dilakukan secara langsung dalam prosedur pengujian. Misalnya dengan melakukan pengujian kinerja, seperti mensimulasikan kerusakan instalasi, dan lain sebagainya. Dalam menghitung nilai uji yang diizinkan ada dua pendekatan dalam memperhitungkan perbedaan antara nilai uji yang di laboratorium dan nilai kinerja yang diinginkan yaitu sebagai berikut.

1. Menggunakan faktor keamanan yang sangat tinggi.
2. Menggunakan faktor reduksi pada nilai pengujian yang dihasilkan di laboratorium untuk menjadikannya nilai yang diperbolehkan dilokasi tertentu.

Berikut Persamaan (2.38) dan (2.39) untuk menghitung kuat tarik yang diizinkan.

$$T_{all} = T_{ult} \left(\frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CBD}} \right) \quad (2.38)$$

$$T_{all} = T_{ult} \left(\frac{1}{\Pi RF} \right) \quad (2.39)$$

Dimana:

| | | |
|------------|---|---|
| T_{all} | = | Kuat tarik izin |
| T_{ult} | = | Kuat tarik <i>ultimate</i> |
| RF_{ID} | = | Faktor reduksi RF_{ID} untuk kerusakan instalasi ($\geq 1,0$) |
| RF_{CR} | = | Faktor reduksi RF_{CR} oleh pengaruh rayapan (<i>creep</i>) saat masa layanan struktur ($\geq 1,0$) |
| RF_{CBD} | = | Faktor reduksi RF_{CBD} untuk degradasi kimia dan biologi ($\geq 1,0$) |
| ΠRF | = | Faktor reduksi kumulatif ($\geq 1,0$) |

Berikut Tabel 2.10 yang menyajikan nilai faktor reduksi yang direkomendasikan untuk Persamaan (2.38) yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.10 Nilai Faktor Reduksi

| Area | Rentang Faktor Reduksi | | |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| | Kerusakan Instalasi | Sifat Perpanjangan (<i>Creep</i>) | Degradasi Kimia/Biologi |
| <i>Separation</i> | 1,10 – 2,50 | 1,50 – 2,50 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Cushioning</i> | 1,10 – 2,00 | 1,20 – 1,50 | 1,00 – 2,00 |
| <i>Unpaved roads</i> | 1,10 – 2,00 | 1,50 – 2,50 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Walls</i> | 1,10 – 2,00 | 2,00 – 4,00 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Embankment</i> | 1,10 – 2,00 | 2,00 – 3,50 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Bearing and foundations</i> | 1,10 – 2,00 | 2,00 – 4,00 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Slope stabilization</i> | 1,10 – 1,50 | 2,00 – 3,00 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Pavement overlays</i> | 1,10 – 1,50 | 1,00 – 2,00 | 1,00 – 1,50 |

| Area | Rentang Faktor Reduksi | | |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| | Kerusakan Instalasi | Sifat Perpanjangan (<i>Creep</i>) | Degradasi Kimia/Biologi |
| <i>Railroads (filter/sep.)</i> | 1,10 – 3,00 | 1,00 – 1,50 | 1,50 – 2,00 |
| <i>Flexible forms</i> | 1,10 – 1,50 | 1,50 – 3,00 | 1,00 – 1,50 |
| <i>Silt fences</i> | 1,10 – 1,50 | 1,50 – 2,50 | 1,00 – 1,50 |

Sumber: (Koerner, 2005)

2.8 Limit Elemen Hingga

2.8.1 Geo5

Geo5 adalah program sebuah perangkat lunak yang dirancang untuk membantu dalam menganalisis stabilitas dalam geoteknik (Kusumastuti et al., 2017). Analisis stabilitas timbunan pada program tersebut menggunakan metode *Limit Equilibrium Method* (LEM). LEM adalah metode yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya (Liong & Herman, 2012).

Ada beberapa parameter tanah yang harus diinput ke program tersebut yaitu seperti berat isi tanah, *undrained shear strength*, nilai kohesi dan sudut geser efektif, *poisson ratio*, nilai E_{def} , serta nilai permeabilitas.

2.9 Penentuan Parameter Tanah

Dalam menentukan parameter tanah yang tidak ada dalam data laboratorium yaitu dengan cara korelasi dengan N-SPT.

2.9.1 Berat Isi Tanah

Berikut Tabel 2.11 menyajikan parameter untuk korelasi mencari berat isi tanah granular dan tanah kohesif.

Tabel 2.11 Berat Isi Tanah Granular dan Kohesif

| <i>Soil Group</i> | <i>Typical Soils in Group</i> | <i>Bulk Unit Weight (kN/m³)</i> | | <i>Saturated Unit Weight (kN/m³)</i> | |
|-----------------------|------------------------------------|--|--------------|---|--------------|
| | | <i>Loose</i> | <i>Dense</i> | <i>Loose</i> | <i>Dense</i> |
| <i>Granular soils</i> | <i>Gravel</i> | 16,00 | 18,00 | 20,00 | 21,00 |
| | <i>Well graded sand and gravel</i> | 19,00 | 21,00 | 21,00 | 23,00 |
| | <i>Coarse or medium sand</i> | 16,50 | 18,50 | 20,00 | 21,50 |
| | <i>Well graded sand</i> | 18,00 | 21,00 | 20,50 | 22,50 |
| | <i>Fine or silty sand</i> | 17,00 | 19,00 | 20,00 | 21,50 |
| | <i>Rock fill</i> | 15,00 | 17,50 | 19,50 | 21,00 |
| | <i>Brick hardcore</i> | 13,00 | 17,50 | 16,50 | 19,00 |
| | <i>Slag fill</i> | 12,00 | 15,00 | 18,00 | 20,00 |
| | <i>Ash fill</i> | 6,50 | 10,00 | 13,00 | 15,00 |
| <i>Cohesive soils</i> | <i>Peat (high variability)</i> | 12,00 | | 12,00 | |
| | <i>Organic clay</i> | 15,00 | | 15,00 | |
| | <i>Soft clay</i> | 17,00 | | 17,00 | |
| | <i>Firm clay</i> | 18,00 | | 18,00 | |
| | <i>Stiff clay</i> | 19,00 | | 19,00 | |
| | <i>Hard clay</i> | 20,00 | | 20,00 | |
| | <i>Stiff or hard glacial clay</i> | 21,00 | | 21,00 | |

Sumber: (Ameratunga et al., 2016)

Selain itu ada juga persamaan untuk menentukan berat isi tanah *saturated* menurut (Hardiyatmo, 2005) yaitu dapat dilihat pada Persamaan (2.40).

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} \quad (2.40)$$

Dimana:

G_s = Berat jenis tanah

e = Angka pori

γ_w = Berat volume air (kN/m³)

2.9.2 Shear Strength (S_u)

Berikut Tabel 2.12 untuk melihat karakteristik tanah kohesif atau granular dalam mencari nilai *shear strength* yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.12 Klasifikasi Penentuan Nilai *Shear Strength* (S_u)

| <i>Subsurface Condition</i> | <i>Penetration Resistance Range, N (Bpf)</i> | <i>Shear Strength, S_u (Psf)</i> | <i>Shear Strength, S_u (kPa)</i> |
|------------------------------------|---|--|--|
| <i>Very soft</i> | 0,00 – 2,00 | 250,00 | 11,97 |
| <i>Soft</i> | 2,00 – 4,00 | 375,00 | 17,96 |
| <i>Medium</i> | 4,00 – 8,00 | 750,00 | 35,91 |
| <i>Stiff</i> | 8,00 – 15,00 | 1500,00 | 71,82 |
| <i>Very stiff</i> | 15,00 – 30,00 | 3000,00 | 143,64 |
| <i>Hard</i> | > 30,00 | 4000,00 | 191,52 |

Sumber: (Jay Ameratunga & Das, 2016)

Dalam buku (Ameratunga et al., 2016) untuk menghitung kuat geser *undrained* yaitu menggunakan Persamaan (2.41).

$$S_u = c_u + \sigma \tan \varphi \quad (2.41)$$

Dimana:

$$S_u = \text{Shear strength (kN/m}^2\text{)}$$

$$c_u = \text{Kuat geser undrained (kN/m}^2\text{)}$$

$$\sigma = \text{Tegangan (kN/m}^2\text{)}$$

2.9.3 Poisson Ratio (ν)

Berikut Tabel 2.13 tabel parameter untuk korelasi mencari nilai *poisson ratio* (ν) yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.13 Klasifikasi Penentuan Nilai *Poisson Ratio* (ν)

| Material | <i>Poisson ratio, (ν)</i> |
|------------------------------------|---|
| <i>Saturated clays (undrained)</i> | 0,50 |
| <i>Saturated clays (drained)</i> | 0,20 – 0,40 |

| Material | Poisson ratio, (ν) |
|-------------------|--|
| <i>Dense sand</i> | 0,30 – 0,40 |
| <i>Loose sad</i> | 0,10 – 0,30 |
| <i>Loess</i> | 0,10 – 0,30 |
| <i>Ice</i> | 0,36 |
| <i>Aluminum</i> | 0,35 |
| <i>Steel</i> | 0,29 |
| <i>Concrete</i> | 0,15 |

Sumber: (Ameratunga et al., 2016)

2.9.4 Kohesi Efektif (c') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

Berikut Tabel 2.14 tabel parameter untuk korelasi mencari nilai kohesi efektif (c') dan sudut geser efektif (ϕ') yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.14 Klasifikasi Penentuan Nilai Kohesi Efektif (c') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

| Soil Group | Typical Soils in Group | Soil Parameters | |
|-------------------|---|---|-----------------------------------|
| | | c' (kN/m²) | ϕ' (°) |
| <i>Poor</i> | <i>Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts</i> | 0,00 – 5,00 | 17,00 – 25,00 |
| <i>Average</i> | <i>Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clays fills</i> | 0,00 – 10,00 | 26,00 – 32,00 |
| <i>Good</i> | <i>Gravelly sands, compacted sands, controlled crushed sandstone and graveled fills, dense well graded sands</i> | 0,00 – 5,00 | 32,00 – 37,00 |
| <i>Very good</i> | <i>Weak weathered rock, controlled fills of road base, gravel and recycled concrete</i> | 0,00 – 25,00 | 36,00 – 43,00 |

Sumber: (Ameratunga et al., 2016)

2.9.5 Modulus Deformasi (E_{def})

Modulus deformasi adalah massa batuan dan kekuatan batuan dalam membuat pemodelan numerik untuk mengevaluasi stabilitas lereng dan terowongan (Rusydy et al., 2020). Dalam menentukan nilai modulus deformasi yaitu menggunakan persamaan yang dapat dilihat pada Persamaan (2.42).

$$E_{def} = N-SPT \times 5 \times 300 \quad (2.42)$$

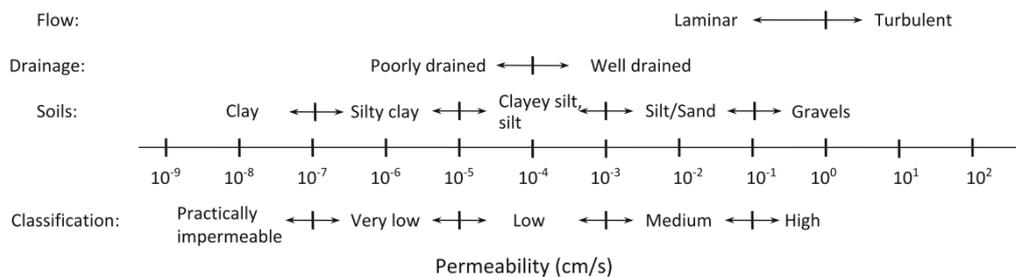
Dimana:

$$E_{def} = \text{Modulus deformasi (kN/m}^2\text{)}$$

$$N-SPT = \text{Nilai N-SPT}$$

2.9.6 Koefisien Permeabilitas (k)

Dalam menentukan nilai koefisien arah vertikal (k_v) dan koefisien arah horizontal (k_h) dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Penentuan Koefisien Permeabilitas (k)

Sumber: (Ameratunga et al., 2016) dalam (Warman, 2019)

2.9.7 Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal (c_v)

Menurut (Look, 2007) nilai c_v bergantung pada nilai permeabilitas tanah dan kompresibilitasnya. Kompresibilitas adalah parameter yang bergantung pada tegangan. Oleh karena itu, nilai c_v bergantung pada tingkat tegangannya. Berikut Persamaan (2.43) untuk mencari nilai c_v .

$$c_v = \frac{k}{m_v \times \gamma_w} \quad (2.43)$$

Dimana:

| | | |
|------------|---|---------------------------------------|
| k | = | Koefisien permeabilitas |
| m_v | = | Koefisien kemampumampatan volume |
| γ_w | = | Berat volume air (kN/m ³) |

2.9.8 Indeks Kompresi (c_c)

Nilai Indeks Kompresi (c_c) berlaku untuk tanah kohesif atau lempung. Rentang nilai indeks kompresi bisa sangat bervariasi, bergantung pada jenis tanahnya. Dalam buku (Ameratunga et al., 2016), Pada tahun 1948 Terzaghi dan Peck memberikan korelasi empiris untuk nilai indeks kompresi yang dinyatakan dalam Persamaan (2.44).

$$c_c = 0,009(LL - 10) \quad (2.44)$$

Kemudian nilai c_c juga dapat ditentukan berdasarkan klasifikasi kompresibilitas yang dapat dilihat pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Klasifikasi Penentuan Nilai Indeks Kompresi Berdasarkan Klasifikasi Kompresibilitas

| <i>Compressibility</i> | Indeks Kompresi (c_c) |
|---------------------------------|---|
| <i>Slight or low</i> | < 0,20 |
| <i>Moderate of intermediate</i> | 0,20 – 0,40 |
| <i>High</i> | > 0,40 |

Sumber: (Ameratunga et al., 2016)

2.9.9 Indeks Pengembangan (c_s)

Menurut Buku (Jay Ameratunga & Das, 2016) berikut persamaan dalam mencari nilai c_s , yaitu dapat dilihat pada Persamaan (2.45).

$$c_s = \frac{1}{5} c_c \text{ hingga } \frac{1}{10} c_c \quad (2.45)$$