

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Karakteristik Tanah Lunak

Tanah adalah kumpulan agregat/ butiran mineral alami yang bisa dipisahkan oleh suatu cara mekanik bila agregat tersebut diaduk dalam air. Tanah terdiri dari kumpulan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*) yang terletak diatas batuan dasar (*bad rock*). Menurut K. Terzaghi, tanah terdiri dari butiran-butiran material hasil pelapukan massa batuan *massive*, dimana ukuran butirannya bisa sebesar bongkahan, erangka, kerikil, pasir, lanau, lempung, dan kontak butirnya tidak tersementasi termasuk bahan organik.

Lapisan tanah yang disebut sebagai lapisan tanah yang lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) yang mempunyai harga penetrasi standar (SPT) N yang lebih kecil dari 4 atau tanah organik seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi.

Tanah lempung merupakan tanah kohesif yang memiliki:

1. Nilai kadar air berkisar antara 30% – 50 % pada kondisi jenuh air.
2. Angka pori berkisar antara 0,9 sampai dengan 1,4 (Das, 2010).
3. Berat volume berkisar antara $0,9 \text{ t/m}^3$ sampai dengan $1,25 \text{ t/m}^3$ (Das, 2010).
4. *Spesific Gravity* rata – rata berkisar antara 2,70 sampai dengan 2,90.

Tanah lempung memiliki gaya geser yang kecil, kemampatan yang besar, dan koefisien permeabilitas yang kecil. Nilai kekuatan geser tanah lempung lembek ditentukan dari ikatan butiran antar partikel tanah. Tanah lempung lembek merupakan tanah lunak yang mempunyai kadar air yang bervariasi. Apabila tanah lempung lembek diberi beban melampaui daya dukung kritisnya, maka secara langsung akan terjadi pemampatan pada rongga antar partikel tanah dalam jangka waktu yang cukup lama.

Dari permasalahan di atas, secara teknis tanah lempung bersifat kurang menguntungkan untuk mendukung suatu pekerjaan konstruksi. Hal ini seringkali menjadi kendala dalam pelaksanaan suatu pekerjaan konstruksi.

2.2 Uji Pemboran Lapangan (*Boring Test*)

Uji pemboran dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh contoh tanah tidak terganggu (*undisturbed sample*) maupun contoh tanah terganggu (*disturbed sample*). Hasil dari uji pemboran dapat digunakan untuk mengkorelasikan lapisan-lapisan tanah/batuan dan mengidentifikasi sifat-sifat fisik serta karakteristik batuan dasar. Maksud dilakukan uji pemboran adalah untuk menentukan letak dan kedalaman lapisan tanah keras dalam perencanaan fondasi bor tiang pada bangunan gedung bertingkat. Sampel yang diperoleh pada uji pemboran selanjutnya digunakan untuk mencari parameter-parameter tanah melalui pengujian laboratorium.

Uji pemboran dilakukan dengan memutar dan menekan tabung tunggal yang dilengkapi mata bor pada ujung bawah dengan bantuan mesin bor rotari. Tanah yang masuk ke dalam tabung dikeluarkan secara periodik. Setiap pelaksanaan uji pemboran selalu diikuti dengan uji penetrasi standar (*standard penetration test*).

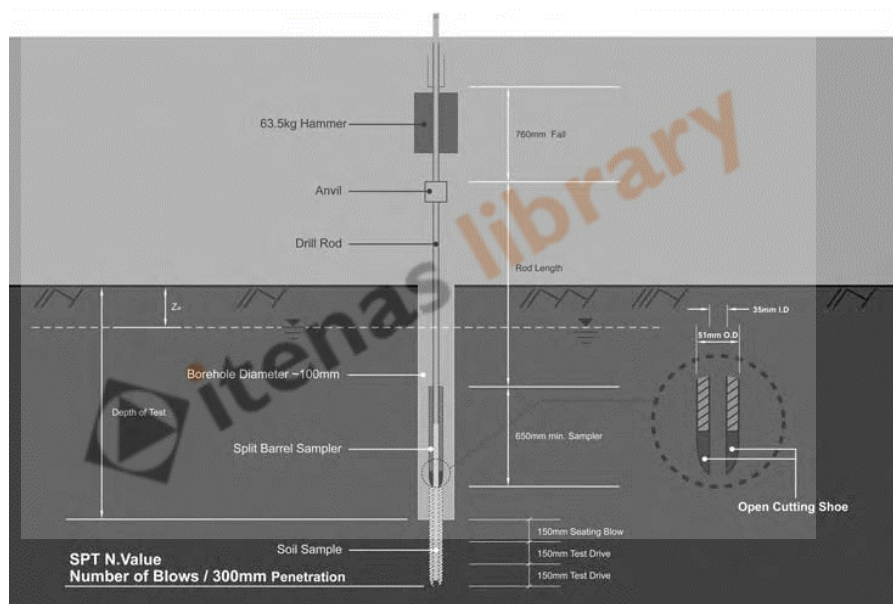
2.2.1 Uji Penetrasi Standar

Uji penetrasi standar atau uji spt adalah uji yang dilakukan mengetahui perlawanan dinamik tanah dengan teknik penumbukan. Uji spt terdiri atas pengukuran jumlah pukulan untuk memasukan tabung belah sedalam 45 cm ($N_1+N_2+N_3$) dalam arah tegak.

Menurut Burt G. Look (2007), dalam sistem beban jatuh ini digunakan palu dengan beban 140 lb (63,5 kg) yang dijatuhkan secara berulang dengan ketinggian 30 in (760 mm). Pelaksanaan pengujian dibagi menjadi 3 (tiga) tahap, yaitu berturut-turut setebal 6 in (15 cm) untuk masing-masing tahap. Tahap pertama dicatat sebagai dudukan, sementara jumlah pukulan untuk memasukkan

tahap kedua dan ketiga dijumlahkan untuk memperoleh nilai pukulan N atau perlawanan SPT (dinyatakan dalam pukulan /30 cm atau pukulan per *foot (ft)*). Uji SPT dilakukan pada setiap 2 m pengeboran dan dihentikan pada saat nilai N-SPT ≥ 60 berturut-turut sebanyak 3 (tiga) kali.

Nilai N-SPT yang telah didapat digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan korelasi lapisan tanah/batuan. Hubungan antara nilai N-SPT dengan jenis konsistensi tanah dapat dilihat pada Tabel 2.1. selanjutnya, jenis konsistensi tanah dapat digunakan untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dan nilai angka poisson menggunakan tabel korelasi yang disajikan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.



Gambar 2.1 Uji Penetrasi Standar

Sumber : (Look, 2007)

Tabel 2.1 Korelasi Nilai N-SPT dan Konsistensi Tanah

| Lempung | | | Pasir | | |
|-------------|---------|-------------------------|-------------|---------|------------|
| Konsistensi | N-SPT | Cu (kN/m ²) | Konsistensi | N-SPT | ϕ (°) |
| Very Soft | 0 - 2 | <12 | Very Loose | 0 - 4 | <28 |
| Soft | 2 - 4 | 12 - 25 | Loose | 4 - 10 | 28 - 30 |
| Medium | 4 - 8 | 25 - 50 | Medium | 10 - 30 | 31 - 36 |
| Stiff | 8 - 15 | 50 - 100 | Dense | 30 - 50 | 37 - 40 |
| very Stiff | 15 - 30 | 100 - 200 | Very Dense | >50 | >41 |
| Hard | >30 | >200 | | | |

Sumber : (Terzaghi & Peck, 1967)

Tabel 2.2 Korelasi Jenis Tanah dan Modulus Elastisitas

| Jenis Tanah | E (kN/m ²) |
|-------------|------------------------|
| Soft Clay | 1800 - 3500 |
| Hard Clay | 6000 - 14000 |
| Loose Sand | 10000 - 28000 |
| Dense Sand | 35000 - 70000 |

(Das, 2010)

Tabel 2.3 Korelasi Jenis Tanah dan Nilai Poisson

| Jenis Tanah | Poisson's Ratio (μ_s) |
|-------------|-----------------------------|
| Loose Sand | 0.2 - 0.4 |
| Medium Sand | 0.25 - 0.4 |
| Dense Sand | 0.3 - 0.45 |
| Silty Sand | 0.2 - 0.4 |
| Soft Clay | 0.15 - 0.25 |
| Medium Clay | 0.2 - 0.5 |

(Das, 2010)

2.3 Pengujian Laboratorium

Pengujian tanah di laboratorium dilakukan untuk mendapatkan parameter tanah seperti sifat fisik tanah (*physical properties*) dan sifat mekanik tanah (*soil mechanical properties*) yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung tanah dan stabilitas bangunan gedung bertingkat.

2.3.1 Sifat-Sifat Fisik (*Physical Properties*)

1. Kadar Air (*Water Content*)

Kadar air adalah perbandingan berat air yang mengisi rongga pori material tanah atau material batuan terhadap berat partikel padatnya, yang dinyatakan dalam persen. Kadar air digunakan untuk menyatakan hubungan antara fase udara, air dan butiran padat yang berada dalam volume material. Kadar air dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

w = Kadar air (%)

W₁ = Berat cawan dan tanah basah (gram)

W₂ = Berat cawan dan tanah kering (gram)

W₃ = Berat cawan (gram)

W₁-W₂ = Berat air (gram)

W₂-W₃ = Berat tanah kering (gram)

2. Berat Isi (*Unit Weight Density*)

Berat isi tanah adalah perbandingan antara berat tanah basah dengan volume wadah, berat isi tanah dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

γ = Berat isi tanah (gr/cm³)

W = Berat tanah basah (gr)

V = Volume wadah (cm³)

3. Berat Isi Kering (*Dry Density*)

Berat isi kering adalah perbandingan antara berat butiran dengan volume total tanah yang dinyatakan dalam gr/cm³. Nilai berat isi kering (γ_d) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

γ_d = Berat isi kering (gr/cm³)

γ = Berat isi tanah (gr/cm³)

w = Kadar air (%)

4. Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Berat jenis adalah perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air. Berat jenis dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

G_s = Berat jenis tanah

γ_s = Berat volume butiran padat

γ_w = Berat volume air

5. Angka Pori (*Void Ratio*)

Angka pori didefinisikan sebagai perbandingan anantara volume pori dan volume butiran padat, angka pori dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

e = Angka pori

V_v = Volume pori

V_s = Volume butiran padat

6. Porositas (*Porosity*)

Porositas adalah perbandingan antara volume pori (V_v) dengan volume total (V) yang dinyatakan dalam nilai persen atau desimal. Porositas dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$n = \frac{V_v}{V} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

n = porositas

V_v = Volume pori

V = Volume tanah total

7. Derajat Kejenuhan (*Degree of Saturation*)

Derajat kejenuhan adalah perbandingan antara volume air (V_w) dan volume total rongga pori tanah (V_v) yang dinyatakan dalam nilai persen. Derajat kejenuhan dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

S = Derajat kejenuhan (%)

V_w = Volume air

V_v = Volume pori

2.3.2 Sifat-Sifat Mekanik (*Mechanical Properties*)

1. Uji Geser Langsung (*Direct Shear Test*)

Uji geser langsung bertujuan untuk memperoleh nilai kuat geser tanah pada tegangan normal tertentu dan pada kondisi drainase tertentu. Kuat geser tanah dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$\tau = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana :

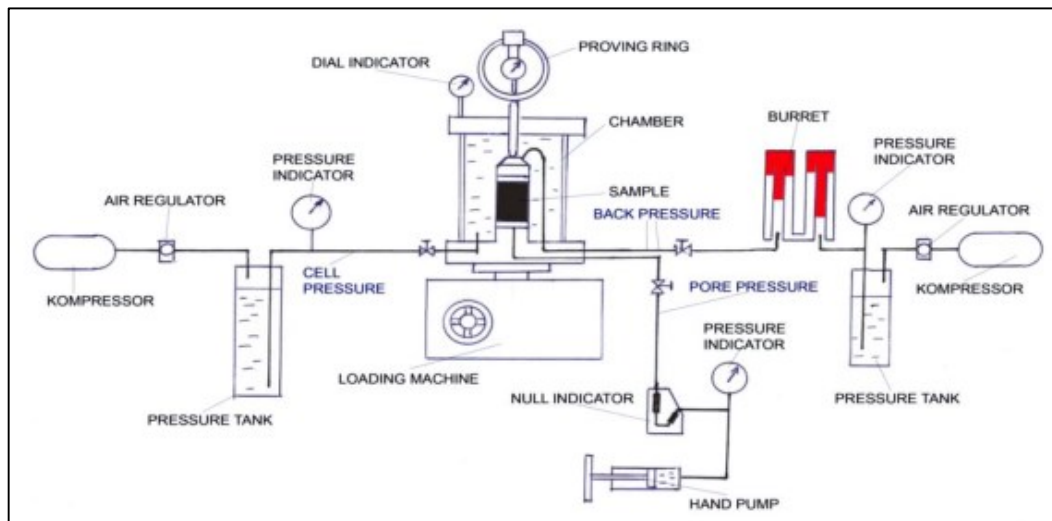
τ = Tegangan geser

P = Tekanan terbesar

A = Luas cincin

2. Uji Geser Triaksial (*Triaxial Shear Test*)

Uji geser triaksial adalah uji yang paling dapat diandalkan untuk menentukan parameter tegangan geser. Uji ini telah digunakan secara luas untuk keperluan pengujian biasa atau untuk keperluan riset. Skema alat triaksial dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema Alat Triaksial
(Sumber: SNI-03-4813, 2004)

Pada uji triaksial umumnya digunakan benda uji sampel tanah dengan diameter 1,5 inchi (38,1 mm) dan panjang 3 inchi (76,2 mm). Benda uji tersebut ditutup dengan membran karet yang tipis dan diletakkan di dalam sebuah bejana silinder dari bahan plastik yang kemudian bejana tersebut diisi dengan air atau larutan gliserin. Di dalam bejana benda uji tersebut akan mendapat tekanan hidrostatik.

Untuk menyebabkan terjadinya keruntuhan geser pada benda uji, tegangan aksial diberikan melalui piston vertikal. Pembebanan arah vertikal dapat dilakukan dengan dua cara:

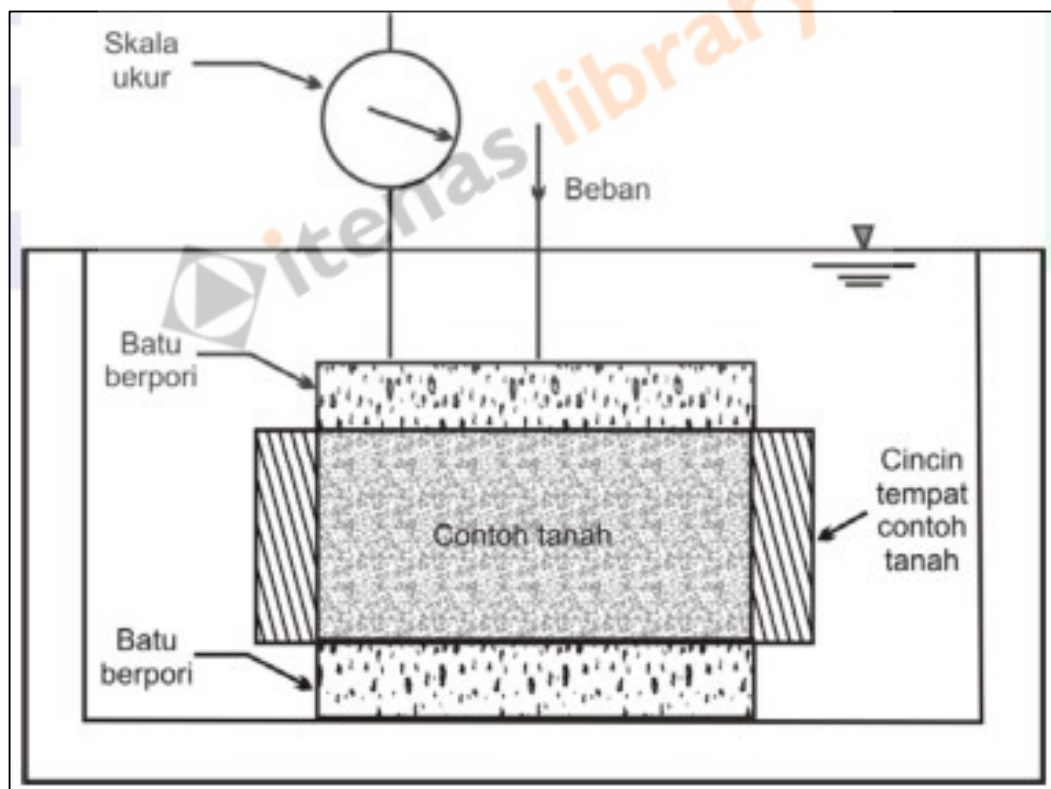
- Dengan memberikan beban mati yang berangsur-angsur dengan penambahan beban yang konstan hingga benda uji runtuh. Deformasi arah aksial akibat pembebanan ini diukur dengan arloji ukur (*dial gauge*).
- Dengan memberikan deformasi arah aksial dengan kecepatan deformasi yang tetap dengan bantuan gigi-gigi mesin atau pembebanan hidrolis. Cara ini disebut juga sebagai uji regangan terkendali.

Beban aksial yang diberikan diukur dengan bantuan sebuah lingkaran pengukur beban (*proving ring*) yang berhubungan dengan piston vertikal. Alat ini juga dilengkapi dengan pipa-pipa untuk mengalirkan air ke dalam benda uji

dan dari dalam benda uji, pipa-pipa tersebut juga berguna sebagai sarana pengukur tegangan air pori pada saat pengujian. Ada 3 (tiga) tipe standar dari uji triaksial yang dilakukan:

- a. *Unconsolidated-undrained test* (UU);
 - b. *Consolidated-undrained test* (CU);
 - c. *Consolidated-drained test* (CD).
3. Uji Konsolidasi (*Consolidation Test*)

Uji konsolidasi hanya dilakukan untuk jenis tanah berbutir halus seperti lempung dan lanau dan digunakan untuk mengukur besarnya penurunan konsolidasi dan kecepatan penurunan. Pengujian dilakukan menggunakan alat oedometer atau konsolidometer. Sketsa alat konsolidometer dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sketsa Alat Konsolidometer (*oedometer*)

(Sumber: SNI-2812,2011)

Dari nilai koefisien konsolidasi (C_v) yang dihasilkan, dapat ditentukan kecepatan penurunan bangunan gedung bertingkat. Berdasarkan data hubungan

beban dan penurunan diperoleh koefisien perubahan volume (m_v) atau indeks pemampatan (C_c), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung estimasi penurunan akibat beban bangunan. Uji konsolidasi bisa tidak dilakukan bila tanahnya berupa lempung terkonsolidasi sangat berlebihan (*heavily overconsolidated*) karena pada jenis tanah lempung tersebut sepanjang beban yang diterapkan tidak sangat berlebihan, maka penurunan yang terjadi sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Pengujian Laboratorium yang diuraikan di atas mengikuti Standar Nasional Indonesia (SNI) Sperti diuraikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 SNI Pengujian Laboratorium Tanah

| No | Jenis Pengujian | SNI |
|----|----------------------------|--------------|
| 1 | Kadar Air | 03-1965-1990 |
| 2 | Berat Jenis | 03-1964-1990 |
| 3 | Berat Isi | 03-3637-1994 |
| 4 | Batas Cair - Batas Plastis | 03-1966-1967 |
| 5 | Analisa Saringan | 03-3423-1994 |
| 6 | Kuat Geser Langsung | 03-2813-1992 |
| 7 | Triaxial | 03-4813-1998 |
| 8 | Konsolidasi | 03-2812-1992 |

2.4 Tekanan Tanah Lateral

Tekanan tanah lateral diasumsikan linier sebanding dengan kedalaman tanah sebagai berikut :

$$P = k \times \gamma_s \times z \dots\dots\dots (2.9)$$

keterangan :

P = tekanan tanah lateral (kPa)

k = koefisien tekanan tanah lateral

bisa berupa k_0 (koefisien tekanan tanah kondisi diam) atau ;

k_a (koefisien tekanan tanah kondisi aktif) atau ;

k_p (koefisien tekanan tanah kondisi pasif)

γ_s = berat jenis tanah (kN/m³)

z = kedalaman diukur dari permukaan tanah (m)

Resultan beban tanah lateral akibat timbunan diasumsikan bekerja pada ketinggian $H/3$ dari dasar dinding, di mana H adalah ketinggian dinding diukur dari permukaan tanah di belakang dinding bagian bawah fondasi atau puncak pada telapak.

2.4.1 Koefisien Tekanan Tanah dalam Kondisi Diam (k_0)

Untuk tanah terkonsolidasi normal, dinding vertikal, dan permukaan tanah, koefisien tekanan tanah lateral dalam kondisi diam dapat diambil sebagai :

$$k_0 = 1 - \sin \phi_{ef} \dots \dots \dots (2.10)$$

keterangan :

k_0 = koefisien tekanan tanah lateral kondisi diam

ϕ_{ef} = sudut geser efektif tanah

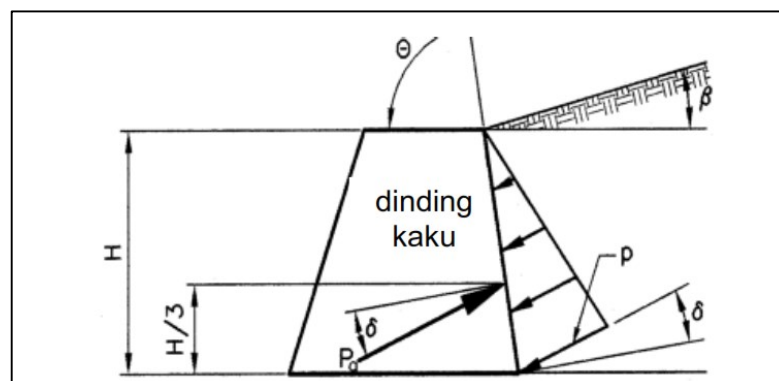
Untuk tanah overkonsolidasi, koefisien tekanan tanah lateral kondisi diam dapat diasumsikan bervariasi sebagai fungsi rasio overkonsolidasi atau riwayat tegangan, dan dapat diambil sebagai :

$$k_0 = (1 - \sin \phi_{ef}) OCR^{(\sin \phi_{ef})} \dots \dots \dots (2.11)$$

keterangan :

OCR = rasio overkonsolidasi

2.4.2 Koefisien Tekanan Tanah Aktif (k_a)



Gambar 2.4 Notasi Untuk Perhitungan Tekanan Tanah Aktif

Nilai-nilai untuk koefisien tekanan tanah lateral aktif dapat diambil sebagai berikut:

$$k_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi_{ef})}{\Gamma[\sin^2\theta \sin(\theta - \delta)]} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan,

$$\Gamma = \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_{ef} + \delta) \sin(\phi_{ef} - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + \beta)}} \right]^2 \dots\dots\dots (2.13)$$

keterangan :

δ = sudut geser antara urukan dan dinding ($^\circ$), nilai δ diambil melalui pengujian laboratorium atau bila tidak memiliki data yang akurat dapat mengacu pada Tabel 2.5.

ϕ_{ef} = sudut geser efektif tanah

β = sudut pada urukan terhadap garis horizontal ($^\circ$)

θ = sudut pada dinding belakang terhadap garis horizontal ($^\circ$)

Tabel 2.5 Sudut geser berbagai material

| Material | Sudut geser δ ($^\circ$) |
|--|--|
| Beton pada material fondasi sebagai berikut : <ul style="list-style-type: none"> Batuan Kerikil, campuran kerikil – pasir, pasir kasar Pasir halus hingga medium, pasir kelanauan medium hingga kasar, kerikil kelanauan atau berlempung Pasir halus, pasir kelanauan atau berlempung halus hingga medium Lanau kepasiran halus, lanau non plastis Lempung prakonsolidasi atau residual yang sangat teguh dan keras Lempung agak teguh hingga lempung teguh, dan lempung kelanauan | 35 29 – 31 24 – 29 19 – 24 17 – 19 22 – 26 17 – 19 |
| Pasangan bata pada material fondasi memiliki faktor geser yang sama | |
| Turap baja terhadap tanah berikut : <ul style="list-style-type: none"> Kerikil, campuran kerikil – pasir, batuan bergradasi baik yang diisi pecahan Pasir, campuran pasir – kerikil berlanau, batuan keras berukuran tunggal Pasir berlanau, kerikil atau pasir bercampur lanau atau lempung Lanau kepasiran halus, lanau non plastis | 22 17 14 11 |
| Beton pracetak atau turap beton terhadap tanah berikut : <ul style="list-style-type: none"> Kerikil, campuran kerikil – pasir, batuan bergradasi baik yang diisi pecahan Pasir, campuran pasir – kerikil berlanau, batuan keras berukuran tunggal Pasir berlanau, kerikil atau pasir bercampur lanau atau lempung Lanau kepasiran halus, lanau non plastis | 22 – 26 17 – 22 17 14 |
| Berbagai material struktural: <ul style="list-style-type: none"> Batu bata pada batu bata, batuan beku dan metamorf: <ul style="list-style-type: none"> Batuan lunak pada batuan lunak Batuan keras pada batuan lunak Batuan keras pada batuan keras Batu bata pada kayu dengan arah kembang kayu menyilang Baja pada baja pada hubungan turap | 35 33 29 26 17 |

Sumber : SNI 1725,2016

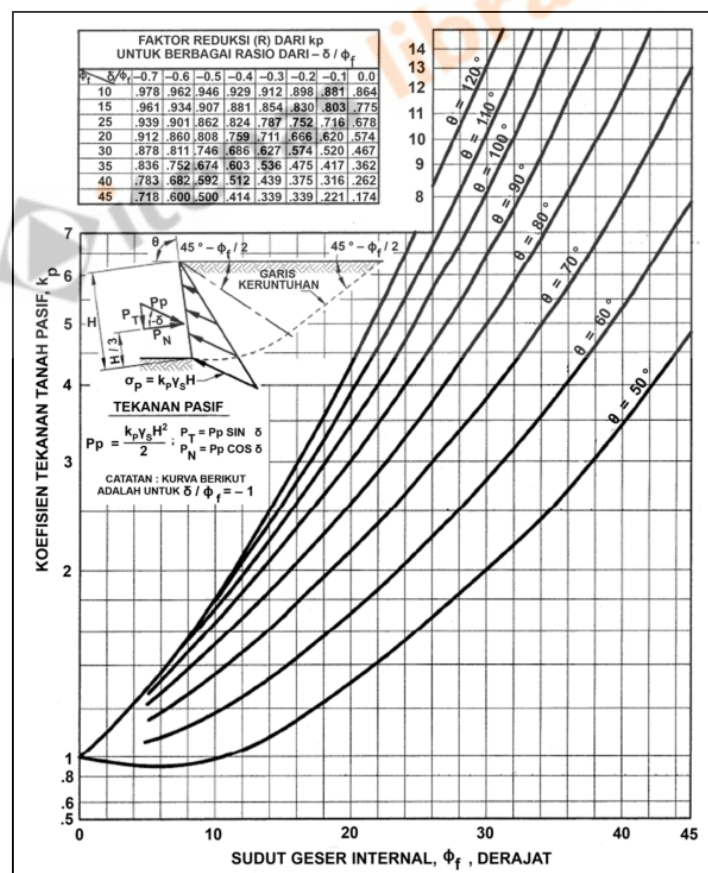
2.4.3 Koefisien Tekanan Tanah Pasif (k_p)

Untuk tanah nonkohesif, nilai koefisien tekanan tanah lateral pasif dapat diambil dari Gambar 2.5 untuk kasus dinding miring atau vertikal dengan timbunan yang rata dan Gambar 2.6 untuk kasus dinding vertikal dan timbunan miring. Untuk tanah kohesif, tekanan pasif dapat dihitung dengan :

$$P_p = k_p \gamma_s z + 2c\sqrt{k_p} \dots\dots\dots (2.14)$$

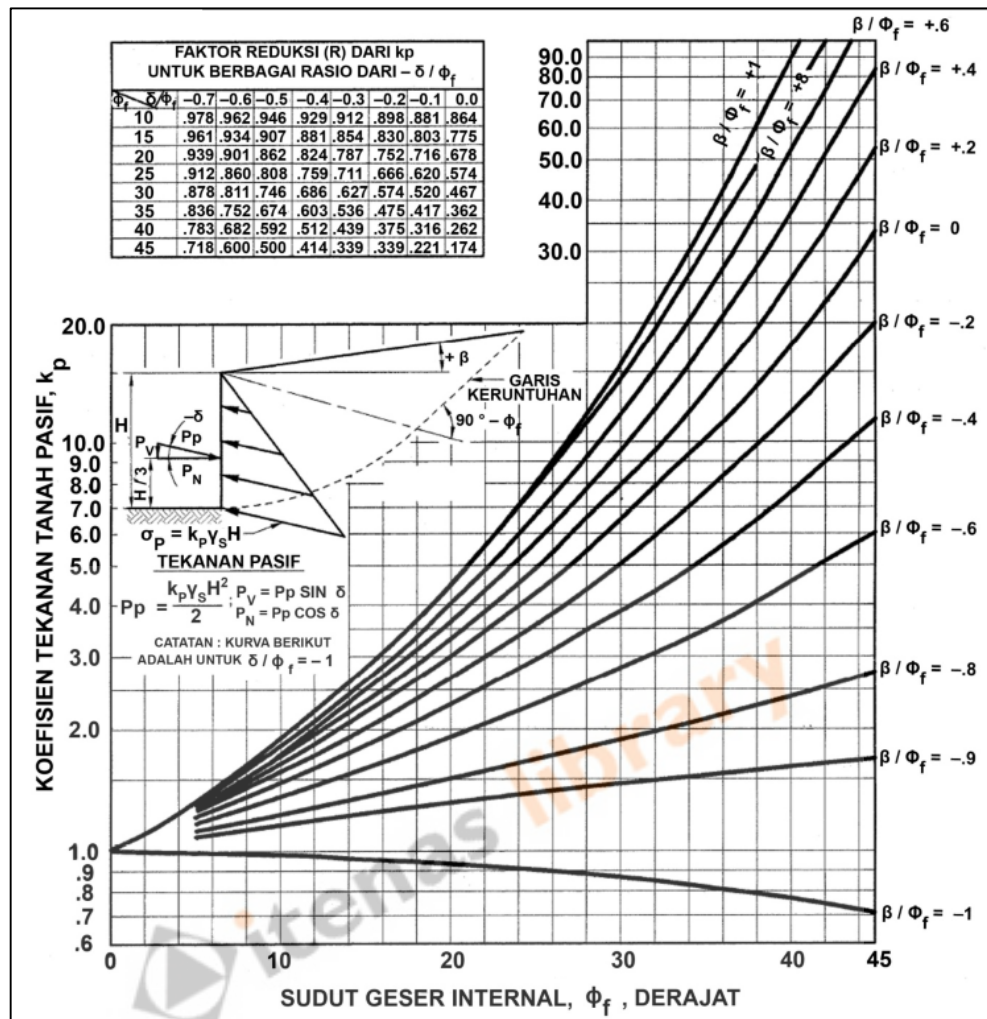
keterangan :

- P_p = tekanan tanah lateral pasif (kPa)
 γ_s = berat jenis tanah (kN/m³)
 z = kedalaman diukur dari permukaan tanah (m)
 c = kohesi tanah (kPa)
 k_p = koefisien tekanan tanah lateral pasif



Gambar 2.5 Nilai Tekanan Tanah Pasif untuk Urukan Horizontal

Sumber : SNI 1725,2016



Gambar 2.6 Nilai Tekanan Tanah Pasif untuk Urukan Membentuk Sudut

Sumber : SNI 1725,2016

2.5 Tanah Timbunan Oprit

Oprit jembatan merupakan segmen jalan yang menghubungkan jalan raya dengan jembatan. Oprit jembatan terdiri dari tanah dasar (*subgrade*), tanah timbunan dan lapis-lapis perkerasan jalan. Tanah timbunan oprit perlu direncanakannya sesuai dengan persyaratan-persyaratan yang berlaku, tanah timbunan untuk oprit juga harus dipadatkan lapis demi lapis sampai pada tinggi permukaan yang direncanakan sehingga lapis-lapis perkerasan jalan pada oprit dapat diletakan.

Lapisan perkerasan di atas tanah timbunan oprit harus selalu mempunyai permukaan yang rata, maka tanah timbunan oprit harus kuat dari permasalahan perubahan bentuk. Permasalahan yang terjadi, baik akibat beban lalu-lintas maupun cuaca, akan mengakibatkan perkerasan di atas tanah timbunan oprit mengalami kerusakan (misal, gelombang, alur, penurunan) yang kemungkinan diikuti dengan terjadinya retak. Perubahan bentuk tanah dasar dapat diakibatkan oleh kekuatan atau daya dukung yang rendah (tanah lunak), pengembangan, penyusutan dan densifikasi tanah dasar serta konsolidasi tanah di bawah tanah dasar.

Timbunan yang didesain dan dibangun dengan seksama akan mempunyai lereng yang stabil dan sampai tingkat tertentu, tidak akan mengalami penurunan. Disamping itu, aspek yang perlu diperhatikan pada pekerjaan timbunan adalah pemilihan bahan serta pemadatannya agar diperoleh timbunan stabil.

Bahan timbunan yang digunakan tidak boleh berasal dari tanah gambut (*peat*) atau lempung organik. Spesifikasi Umum Bina Marga (Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, 2018) menyebutkan bahwa bahan timbunan dapat berasal dari tanah galian. Tetapi, tidak semua tanah hasil galian dapat digunakan untuk bahan timbunan. Bahan untuk timbunan tidak boleh dari bahan galian tanah yang mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Tanah yang mengandung organik seperti jenis tanah OL, OH dan Pt dalam sistem USCS serta tanah yang mengandung daun - daunan, rumput - rumputan, akar, dan sampah.
2. Tanah dengan kadar air alamiah sangat tinggi yang tidak praktis dikeringkan untuk memenuhi toleransi kadar air pada pemadatan (melampaui Kadar Air Optimum + 1%).
3. Tanah ekspansif yang mempunyai sifat kembang susut tinggi dan sangat tinggi dalam klasifikasi *Van Der Merwe* dengan ciri-ciri adanya retak memanjang sejajar tepi perkerasan jalan.

Penurunan tanah akibat pemampatan tanah pada umumnya dapat dibagi menjadi :

1. Penurunan segera (*immediate settelment*) yaitu penurunan yang diakibatkan oleh perubahan bentuk elastis tanah tanpa perubahan kadar air. Penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas (Das, 2010).
2. Penurunan konsolidasi (*consolidation settelment*) yaitu penurunan yang disebabkan oleh perubahan volume tanah akibat keluarnya air yang ada pada pori-pori tanah.

2.6 Perkuatan Tanah dengan *Geotextile*

Geotextile merupakan salah satu jenis bahan *Geosynthesis* yang paling luas penggunaannya dalam bidang teknik sipil. Salah satunya adalah penggunaan pada timbunan. Pada perencanaannya perlu memperhatikan kekuatan tarik dari bahan dalam menerima dan memikul gaya geser saat terjadi kelongsoran. Kekuatan bahan dari *geotextile* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.15 :

$$T_{allow} = T_{ult} \left(\frac{1}{FS_{id} \times FS_{cr} \times FS_{cd} \times FS_{bd}} \right) \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

T_{allow} : kekuatan *geotextile* yang tersedia

T_{ult} : kekuatan Tarik maksimal *geotextile* yang dipakai

FS_{id} : faktor keamanan akibat kerusakan saat pemasangan

FS_{cr} : faktor keamanan terhadap kerusakan akibat rangkai

FS_{cd} : faktor keamanan terhadap kerusakan akibat bahan kimia

FS_{bd} : faktor keamanan terhadap kerusakan akibat aktifitas biologi

Tabel 2.6 Nilai FS menurut kegunaan

| Kegunaan | FS_{id} | FS_{cr} | FS_{cd} | FS_{bd} |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Dinding penahan | 1.1 - 2.0 | 2.0 - 4.0 | 1.0 - 1.5 | 1.0 - 1.3 |
| Timbunan | 1.1 - 2.0 | 2.0 - 3.0 | 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 |
| Overlay Pavement | 1.1 - 1.5 | 1.0 - 1.2 | 1.0 - 1.5 | 1.0 - 1.1 |
| Stabilitas Talud | 1.1 - 1.5 | 1.5 - 2.0 | 1.0 - 1.5 | 1.0 - 1.3 |
| Unpaved Road | 1.1 - 2.0 | 1.5 - 2.5 | 1.0 - 1.5 | 1.0 - 1.2 |
| Pemisah | 1.1 - 2.5 | 1.0 - 1.2 | 1.0 - 1.5 | 1.0 - 1.2 |

Panjang *Geotextile* yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$L = L_e + L_R \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

$$L_R = (H - Z) \times \left[\tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \right] \dots \dots \dots (2.17)$$

$$2 \times \tau \times L_e = \sigma_H \times S_v \times SF \rightarrow \tau = c + \sigma_v \tan \delta \dots \dots \dots (2.18)$$

Sehingga :

$$L_e = \frac{S_v \times \sigma_H \times SF}{2[c + \sigma_v \tan \delta]} \dots \dots \dots (2.19)$$

Keterangan :

L_e : panjang *geotextile* yang berada pada *anchorage zone* (miminum 3 ft/1 m)

L_R : panjang *geotextile* yang berada di depan bidang longsor

δ : sudut geser antara tanah dan *geotextile*

σ_H : tegangan horizontal

σ_v : tegangan vertikal ($\sigma_v = \gamma \cdot z$)

τ : kekuatan geser tanah terhadap *geotextile*

c : kohesi antar tanah dengan *geotextile* ($c = 0$ apabila tanah pasir)

SF : faktor keamanan

Panjang lipatan (L_0) dimana gaya yang diperhitungkan $\frac{1}{2} \sigma_H$ dihitung dengan persamaan :

$$L_0 = \frac{S_v \times \sigma_H \times SF}{4[c + \sigma_v \tan \delta]} \dots \dots \dots (2.20)$$

Keterangan :

δ : sudut geser antara tanah dan *geotextile*

σ_H : tegangan horizontal

σ_v : tegangan vertikal ($\sigma_v = \gamma \cdot z$)

τ : kekuatan geser tanah terhadap *geotextile*

c : kohesi antar tanah dengan *geotextile* ($c = 0$ apabila tanah pasir)

SF : faktor keamanan

Gaya – gaya yang harus diperhatikan pada *Geotextile* yang diaplikasikan untuk dinding penahan tanah (ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8) antara lain :

1. Tanah di belakang dinding
2. Beban luar seperti beban *surcharge* dan beban hidup

Beban horizontal yang diterima dinding (σ_H) :

$$\sigma_H = \sigma_{HS} + \sigma_{Hq} + \sigma_{HL} \dots \dots \dots (2.21)$$

Keterangan :

σ_H : tegangan horizontal yang diterim dinding

σ_{HS} : tegangan horizontal akibat tanah dibelakang dinding

σ_{Hq} : tegangan horizontal akibat tanah timbunan (*surcharge*)

σ_{HL} : tegangan horizontal akibat tanah hidup

Bentuk dan arah tegangan horizontal akibat beban di atas tanah dasar disajikan pada Gambar 2.7. jarak vertikal pemasangan *geotextile* (S_v) seperti pada Gambar 2.7 dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\sigma_{HZ} \times S_v \times l = \frac{T_{all}}{SF} \dots \dots \dots (2.22)$$

$$S_v = \frac{T_{all}}{\sigma_{HZ} \times SF \times l} \dots \dots \dots (2.23)$$

Keterangan :

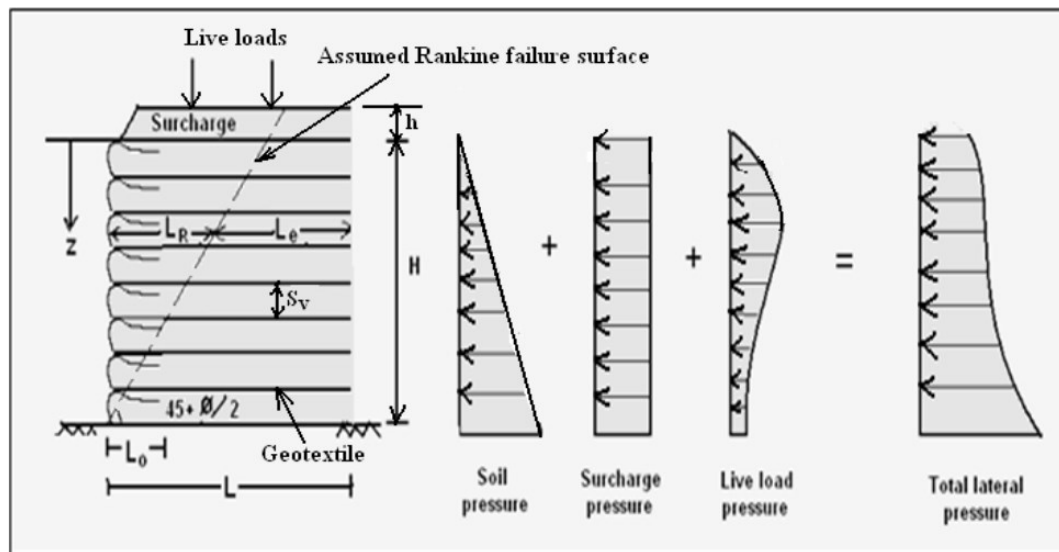
S_v : jarak vertikal pemasangan *geotextile*

l : panjang *geotextile* yang dibutuhkan

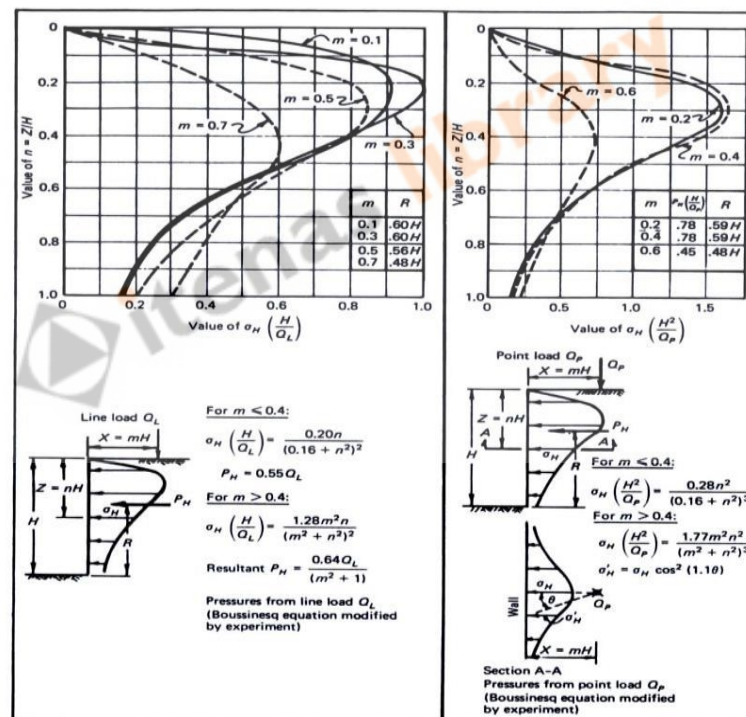
σ_{HZ} : tegangan horizontal pada kedalaman z

T_{all} : kekuatan *geotextile* yang tersedia

SF : Faktor keamanan



Gambar 2.7 Konsep Tekanan Tanah Untuk Dinding *Geotextile* (Koerner, 1999)



Gambar 2.8 Konsep Penyaluran Beban Titik dan Beban Garis

SNI 8460 tahun 2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik menyebutkan bahwa perencanaan perkuatan tanah dengan *geotextile* perlu ditinjau stabilitasnya pada :

1. Stabilitas eksternal
2. Stabilitas internal

2.6.1 Stabilitas Eksternal

Empat potensi kegagalan eksternal digunakan untuk kontrol stabilisasi perkuatan *geotextile*, antara lain :

1. Pergerakan lateral tanah dasar

Untuk menjaga kestabilan terhadap geser seperti Gambar 2.9 dilakukan perhitungan menggunakan persamaan :

$$SF_{geser} = \frac{\Sigma \text{ gaya penahan}}{\Sigma \text{ gaya pendorong}} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$SF_{geser} = \frac{\left[c + \left(\frac{W_i + P_a \sin \delta}{L} \right) \tan \delta \right] \times L}{P_a \cos \delta} \dots\dots\dots (2.25)$$

Keterangan :

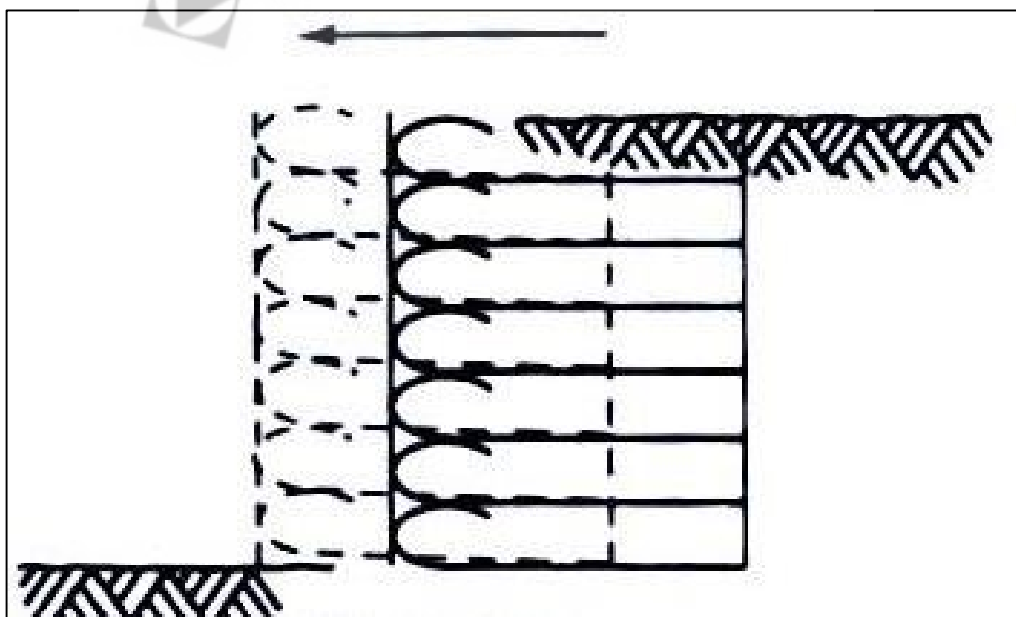
W_i : berat dinding tanah

P_a : tekanan tanah aktif

δ : sudut geser antara tanah dan *geotextile*

L : panjang *geotextile*

SF_{geser} : Faktor keamanan terhadap kestabilan geser



Gambar 2.9 Geser (*Sliding*)

2. Pembatasan eksentrisitas resultan gaya – gaya (pembatasan momen guling)

Untuk menjaga kestabilan terhadap guling seperti Gambar 2.10 dilakukan perhitungan menggunakan persamaan :

$$SF_{guling} = \frac{\Sigma \text{ gaya penahan}}{\Sigma \text{ gaya pendorong}} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$SF_{guling} = \frac{W_i \times X_i + P_a \sin \delta \times L}{P_a \cos \delta \times (H/3)} \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan :

W_i : berat dinding tanah

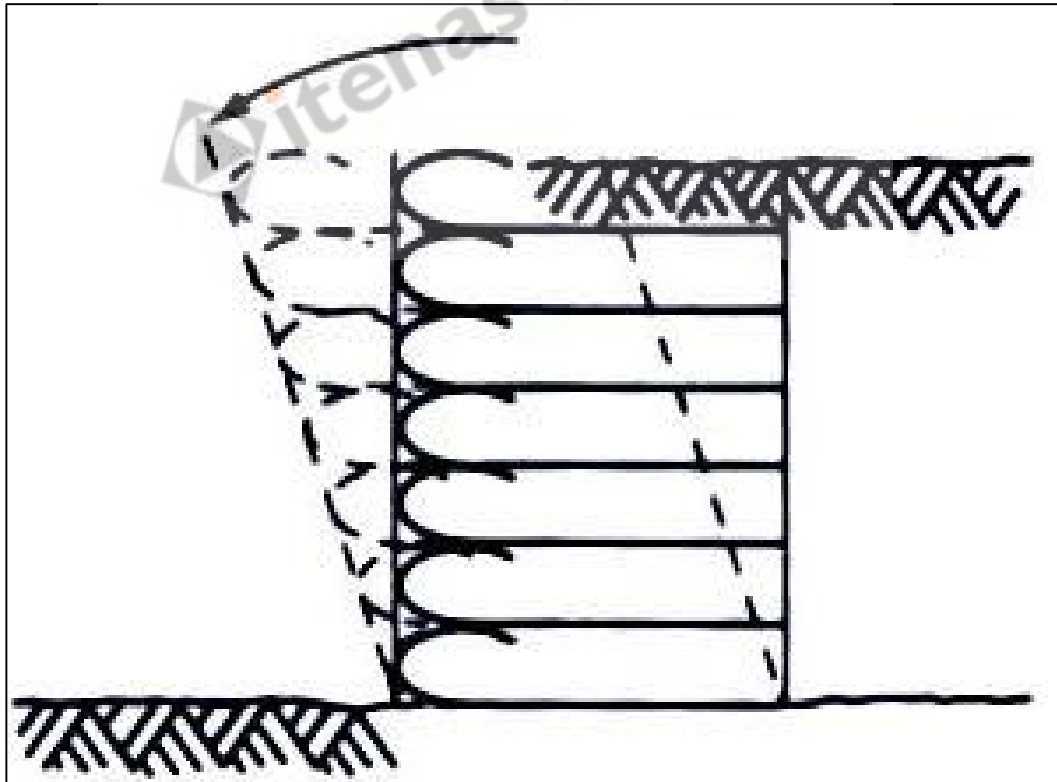
X_i : jarak ke titik berat

P_a : tekanan tanah aktif

δ : sudut geser antara tanah dan *geotextile*

L : panjang *geotextile*

SF_{guling} : Faktor keamanan terhadap kestabilan guling



Gambar 2.10 Guling (*Over Turning*)

3. Daya dukung

Untuk menjaga kestabilan terhadap daya dukung tanah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan :

$$SF = \frac{q_{ultimate}}{q_{actual}} \dots\dots\dots (2.28)$$

Perhitungan q_{ult} menggunakan teori daya dukung untuk pondasi dangkal sedangkan q_{act} adalah tegangan yang disebabkan oleh beban luar (berat timbunan dan beban lain yang bekerja diatas timbunan). Kontrol daya dukung tanah yang dikemukakan oleh Terzaghi adalah

$$q_{ultimate} = 0,5 \times \gamma \times B \times N_{\gamma} + C \times N_c + (\gamma \times D + q_0)N_q \dots\dots\dots (2.29)$$

Keterangan :

$q_{ultimate}$: tegangan tanah maksimum

σ_{HS} : lebar dasar pondasi

σ_{Hq} : kedalaman pondasi (terdalam)

σ_{HL} : berat volume tanah

C : kohesi tanah

N_{γ}, N_c, N_q : koefisien daya dukung tanah akibat ϕ (Tabel 2.7)

Tabel 2.7 Nilai N_c, N_{γ}, N_q (Terzaghi & Peck, 1967)

| ϕ° | N_c | N_{γ} | N_q |
|--------------|--------|--------------|--------|
| 0 | 5.14 | 0.00 | 1.00 |
| 5 | 6.50 | 0.10 | 1.60 |
| 10 | 8.40 | 0.50 | 2.50 |
| 15 | 11.00 | 1.40 | 4.00 |
| 20 | 14.80 | 3.50 | 6.40 |
| 25 | 20.70 | 8.10 | 10.70 |
| 30 | 30.00 | 18.10 | 18.40 |
| 35 | 46.00 | 41.10 | 33.33 |
| 40 | 75.30 | 100.00 | 64.20 |
| 45 | 134.00 | 254.00 | 135.00 |

Untuk mencari tegangan yang terjadi juga dapat digunakan rumus:

Tabel 2.8 Faktor keamanan minimum untuk stabilitas eksternal

| No. | Potensi kegagalan eksternal | Faktor Keamanan (FK) minimum | Persyaratan lain | Langkah perbaikan jika FK tidak terpenuhi |
|--|---|------------------------------|------------------|--|
| 1. | Geser lateral pada dasar | 1,5 | - | Perpanjang L |
| 2. | Eksentrisitas resultan gaya-gaya (momen guling) | 2 (guling) | $e \leq L/6$ | Perpanjang L |
| 3. | Daya dukung | 2,5 | - | Perbaiki tanah fondasi atau perdalam D_m |
| 4. | Stabilitas global | 1,3 | | Perpanjang L atau perbaiki tanah fondasi |
| Keterangan: L adalah panjang perkuatan e adalah eksentrisitas resultan gaya-gaya | | | | |

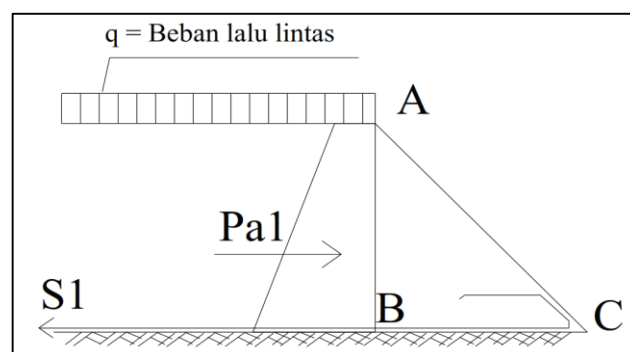
Sumber : SNI 1860,2017

2.6.2 Stabilitas Internal

Kegagalan stabilitas internal dapat terjadi dalam dua moda kegagalan yang berbeda, tetapi keduanya menyebabkan pergerakan yang besar pada struktur, hingga terjadinya keruntuhan pada struktur perkuatan tanah. Kedua moda kegagalan internal tersebut adalah sebagai berikut:

1. kegagalan pada material perkuatan, yaitu perpanjangan yang berlebihan atau putusnya perkuatan, karena tingginya gaya tarik pada perkuatan.
2. kegagalan karena tercabutnya perkuatan dari massa tanah timbunan karena tingginya gaya tarik pada perkuatan.

Dapat dilihat pada Gambar 2.12, Kondisi stabilitas internal tercapai bila tidak terjadi longsor pada lereng AC



Gambar 2.12 Gaya – gaya pada stabilitas internal

$$P_{al} \leq \frac{(\text{Berat efektif } ABC) \times \tan \delta}{SF} \dots\dots\dots (2.34)$$

$$P_{al} \leq S_l \dots\dots\dots (2.35)$$

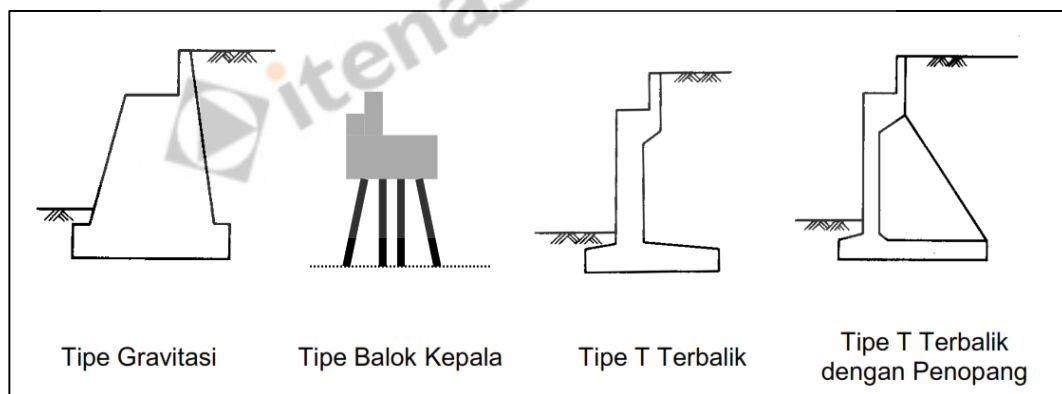
Keterangan :

S_l : kekuatan Tarik material *geotextile* yang diijinan (T_{allow})

SF : Faktor keamanan = 1,5

2.7 Abutment

Abutment adalah suatu bangunan yang didesain untuk meneruskan beban dari bangunan atas, baik beban mati atau beban hidup, berat sendiri dari abutment (beban mati) dan tekanan tanah ke tanah pondasi. Jenis dari abutment yang sekarang lazim digunakan adalah abutment dari beton bertulang, sedangkan dari abutment tipe lama dikenal jenis abutment yang dibuat dari pasangan batu kali, sering disebut sebagai abutment tipe gravitasi. Bentuk umum dari tipe-tipe abutment yang sering digunakan seperti yang disajikan pada Gambar 2.13 antara lain:



Gambar 2.13 Tipe – Tipe Abutment

1. Abutment tipe gravitasi

Umumnya dijumpai pada jembatan-jembatan jalan raya maupun jembatan jalan kereta api yang dibangun pada masa kolonial. Tinggi abutment tipe gravitasi ini pada umumnya dibatasi sampai dengan 5 m, bahan yang dipilih untuk abutment tipe ini pasangan batu kali. Pada umumnya abutment tipe ini dipilih karena kondisi tanah dasar baik dan memungkinkan untuk dibuat pondasi langsung.

2. Abutment tipe balok kepala (pile cap)

Dimaksudkan untuk memperkecil berat sendiri dari abutment, sementara itu untuk mencapai tanah keras diperlukan tiang pancang karena lokasi tanah keras yang berfungsi sebagai pondasi untuk memikul jembatan lokasinya “agak dalam” atau “dalam” dihitung dari permukaan tanah dasar.

3. Abutment tipe T terbalik

Tipe ini mulai digunakan pada era tahun 1970-an sampai sekarang, pada umumnya digunakan apabila tinggi abutment berkisar antara 6-12 m. Terkadang perencana mengambil tipe ini meskipun tinggi abutment hanya 2 m, atau bahkan untuk abutment dengan tinggi 15 m juga masih menggunakan tipe ini. Abutment tipe T terbalik ini dapat dipikul oleh tiang pancang, atau sumuran atau bahkan pondasi langsung tergantung, pada kondisi tanah di bawah abutment.

4. Abutment tipe T terbalik dengan penopang

tipe ini umumnya digunakan apabila tinggi abutment berkisar antara 9-20 m. Terkadang perencana mengambil tipe ini meskipun tinggi abutment hanya 5 m. Abutment tipe T terbalik ini dapat dipikul oleh tiang pancang, atau sumuran atau bahkan pondasi langsung tergantung, pada kondisi tanah di bawah abutment. Permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan tipe ini adalah keberadaan penopang akan menyulitkan pemadatan timbunan oprit jembatan.

2.7.1 Pembebanan pada Abutment

Pembebanan yang dihitung untuk perencanaan abutment mengacu kepada SNI 1725:2016 tentang Pembebanan Jembatan, antara lain :

1. Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya, termasuk dalam hal ini adalah berat bahan dan bagian struktur atas jembatan yang merupakan elemen struktural, ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap.

2. Beban Akibat Tekanan Tanah (TA)

Koefisien tekanan tanah nominal harus dihitung berdasarkan sifat-sifat tanah. Sifat-sifat tanah (kepadatan, kadar kelembaban, kohesi sudut geser dalam

dan lain sebagainya) harus diperoleh berdasarkan hasil pengukuran dan pengujian tanah baik di lapangan ataupun laboratorium.

Tekanan tanah lateral pada keadaan batas kekuatan dihitung dengan menggunakan nilai nominal dari γ_s dan nilai rencana dari c serta ϕ_f .

Tanah di belakang dinding penahan biasanya mendapatkan beban tambahan yang bekerja apabila beban lalu lintas bekerja pada bagian daerah keruntuhan aktif teoritis. Besarnya beban tambahan ini adalah setara dengan tanah setebal 0,7 m yang bekerja secara merata pada bagian tanah yang dilewati oleh beban lalu lintas tersebut. Beban tambahan ini hanya diterapkan untuk menghitung tekanan tanah dalam arah lateral saja, dan faktor beban yang digunakan harus sama seperti yang telah ditentukan dalam menghitung tekanan tanah arah lateral. Faktor pengaruh pengurangan dari beban tambahan ini tidak perlu diperhitungkan.

3. Beban yang Berasal dari Struktur Atas

Beban ini didapat dari perencanaan bidang struktur jembatan, berupa besar reaksi perletakan dari beban yang bekerja pada girder jembatan yang disalurkan ke abutment.

4. Aksi Lingkungan

a. Beban Lalu Lintas di Atas Tanah Timbunan

Beban lalu lintas ditambahkan pada seluruh lebar permukaan jalan dan besarnya ditentukan berdasarkan kelas jalan yang diberikan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Beban lalu lintas untuk analisis stabilitas dan beban di luar jalan

| Kelas Jalan | Beban Lalu Lintas (kPa) | Beban diluar Jalan (*) kPa |
|-------------|-------------------------|----------------------------|
| I | 15 | 10 |
| II | 12 | 10 |
| III | 12 | 10 |

Keterangan : (*) Beban dari bangunan rumah – rumah di sekitar lereng
Sumber : (SNI8460:2017)

b. Tekanan Hidrostatis dan Gaya Apung

Permukaan air rendah dan tinggi harus ditentukan selama umur bangunan dan digunakan untuk menghitung tekanan hidrostatik dan gaya apung. Daya

apung harus ditinjau bersamaan dengan gaya akibat aliran. Dalam memperkirakan pengaruh daya apung, harus ditinjau beberapa ketentuan sebagai berikut:

- 1) pengaruh daya apung pada bangunan bawah (termasuk tiang) dan beban mati bangunan atas;
- 2) syarat-syarat sistem ikatan dari bangunan atas;
- 3) syarat-syarat drainase dengan adanya rongga-rongga pada bagian dalam supaya air bisa keluar pada waktu surut.

c. Pengaruh Gempa

Beban gempa diambil sebagai gaya horizontal yang ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons elastik (C_{sm}) dengan berat struktur ekuivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respons (R_d) dengan formulasi sebagai berikut :

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R_d} \times W_t \dots\dots\dots (2.36)$$

Keterangan :

E_Q : adalah gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} : adalah koefisien respons gempa elastis

R_d : adalah faktor modifikasi respons

W_t : adalah berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai (kN)

2.7.2 Stabilitas Abutment

Stabilitas abutment dapat ditentukan dengan menganalisa:

1. Longsor
2. Kegagalan dari tanah dasar
3. Kegagalan gelincir dari tanah di sekeliling abutment

Untuk menambah faktor keamanan disarankan agar abutment diurug setinggi elevasi perletakannya. Hal tersebut akan memberikan akses yang bagus pada konstruksi pelat jembatan (Childs, 1993).

Daya dukung tanah dasar yang diijinkan didapatkan dari survey penyelidikan tanah. Besarnya tekanan yang diijinkan bergantung pada dimensi pondasi dan beban yang bekerja pada abutment jembatan. Beberapa analisa untuk kontrol stabilitas abutment antara lain :

1. Kontrol geser

Kontrol geser dapat dianalisa menggunakan persamaan sebagai Berikut :

$$SF \leq \frac{\text{Gaya penahan}}{\text{Gaya geser}}, SF = 2,2 \dots\dots\dots (2.37)$$

2. Kontrol guling

Untuk menganalisa kontrol guling kita harus menemukan satu titik acuan. Titik acuan dapat diambil dengan melihat bagian terluar dari pangkal abutment. Titik tersebut kemudian dinamakan sebagai titik pusat guling. Langkah selanjutnya adalah menghitung momen penahan dan momen guling. Kontrol guling lalu dihitung dengan menguraikan persamaan sebagai berikut :

$$SF \leq \frac{\text{Momen penahan}}{\text{Momen guling}}, SF = 2,2 \dots\dots\dots (2.38)$$

2.8 Ketahanan Fondasi Tiang Pancang terhadap Gaya Lateral

Fondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah keras terletak sangat dalam. Menurut Tomlison (1980), fungsi pondasi tiang pancang adalah sebagai berikut:

1. Meneruskan beban-beban konstruksi di atas tanah ke lapisan tanah yang mempunyai daya dukung yang besar.
2. Menahan gaya gesekan ke atas
3. Menahan gaya lateral

Selain didesain mampu menahan gaya vertikal, pondasi tiang pancang juga harus didesain mampu menahan gaya lateral yang bekerja padanya. Pada konstruksi jembatan, gaya lateral yang bekerja pada pondasi tiang pancang dapat berupa gaya gesek pada tumpuan bergerak, gaya rem, gaya gempa, gaya akibat angin, dan gaya akibat tekanan tanah.

Menurut NAFVAC DM-7 (1971), gaya lateral yang bekerja pada pondasi tiang pancang seperti disajikan pada Gambar 2.15 dibedakan atas tiga kondisi, antara lain :

1. Tiang pancang yang poernya fleksibel atau tiang pancang yang terjepit diujungnya.
2. Tiang pancang dengan poer kaku menempel diatas permukaan tanah.
3. Tiang pancang dengan poer kaku terletak pada suatu ketinggian.

Prosedur perhitungan untuk masing-masing kondisi adalah sebagai berikut:

1. Kondisi I

- a. Menghitung faktor kekakuan relatif (*relative stiffness factor*).

$$T = \left(\frac{E \times I}{f} \right)^{\frac{1}{5}} \dots \dots \dots (2.39)$$

Keterangan :

T : faktor kekakuan relatif, cm

E : modulus elastisitas tiang, Kg/cm²

I : momen inersia tiang, cm⁴

f : koefisien dari variasi modulus tanah, kg/cm³ (Gambar 2.14) yang sesuai (kN)

- b. Tentukan nilai koefisien defleksi (Fσ), koefisien momen (FM) dan koefisien geser (FV).
- c. Menghitung defleksi, momen dan gaya geser pada kedalaman yang ditinjau berdasarkan rumus yang terdapat pada Gambar 2.16.

2. Konsidi II

- a. Sama dengan langkah a kondisi I.
- b. Tentukan nilai koefisien defleksi (Fσ), koefisien momen (FM) dan koefisien geser (FV).
- c. Menghitung defleksi dan besarnya berdasarkan rumus yang terdapat pada Gambar 2.17.
- d. Gaya geser maksimum dianggap terjadi pada ujung atas tiang pancang, yang besarnya untuk 1 tiang pancang adalah :

$$P = \frac{PT}{n} \dots \dots \dots (2.40)$$

Keterangan :

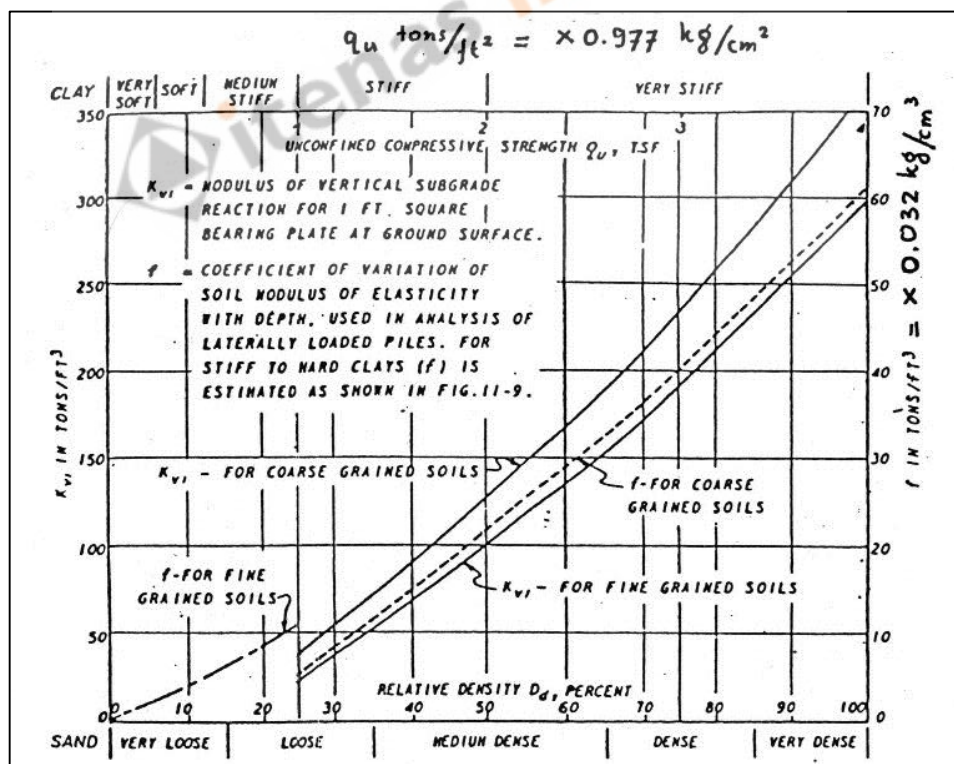
P : besar gaya geser 1 tiang pancang

PT : besar gaya geser total yang bekerja

n : jumlah tiang pancang

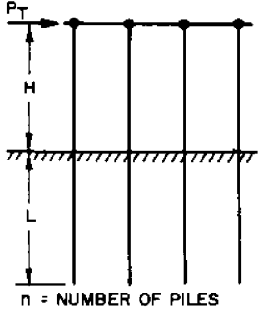
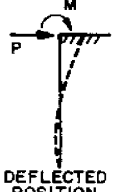
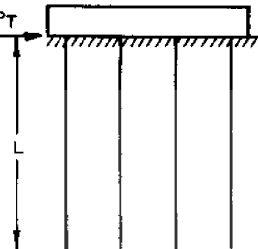

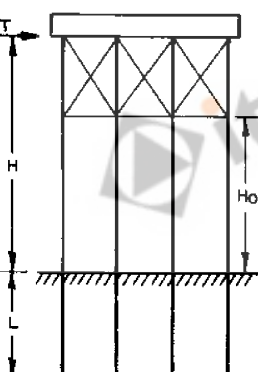
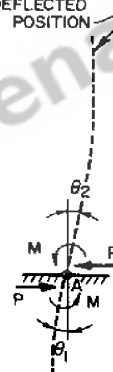
3. Kondisi III

- Anggap pada titik A terjadi jepitan dan momen M, seperti pada Gambar 2.15.
- Menghitung sudut θ_2 diatas tanah.
- Menghitung sudut θ_1 dari koefisien sudut ($F\theta$) dari rumus yang terdapat pada Gambar 2.18.
- Dengan persamaan θ_1 dan θ_2 diperoleh nilai momen.
- Setelah nilai M dan P didapat, besarnya defleksi, gaya geser dan momen dapat dihitung seperti kondisi I.



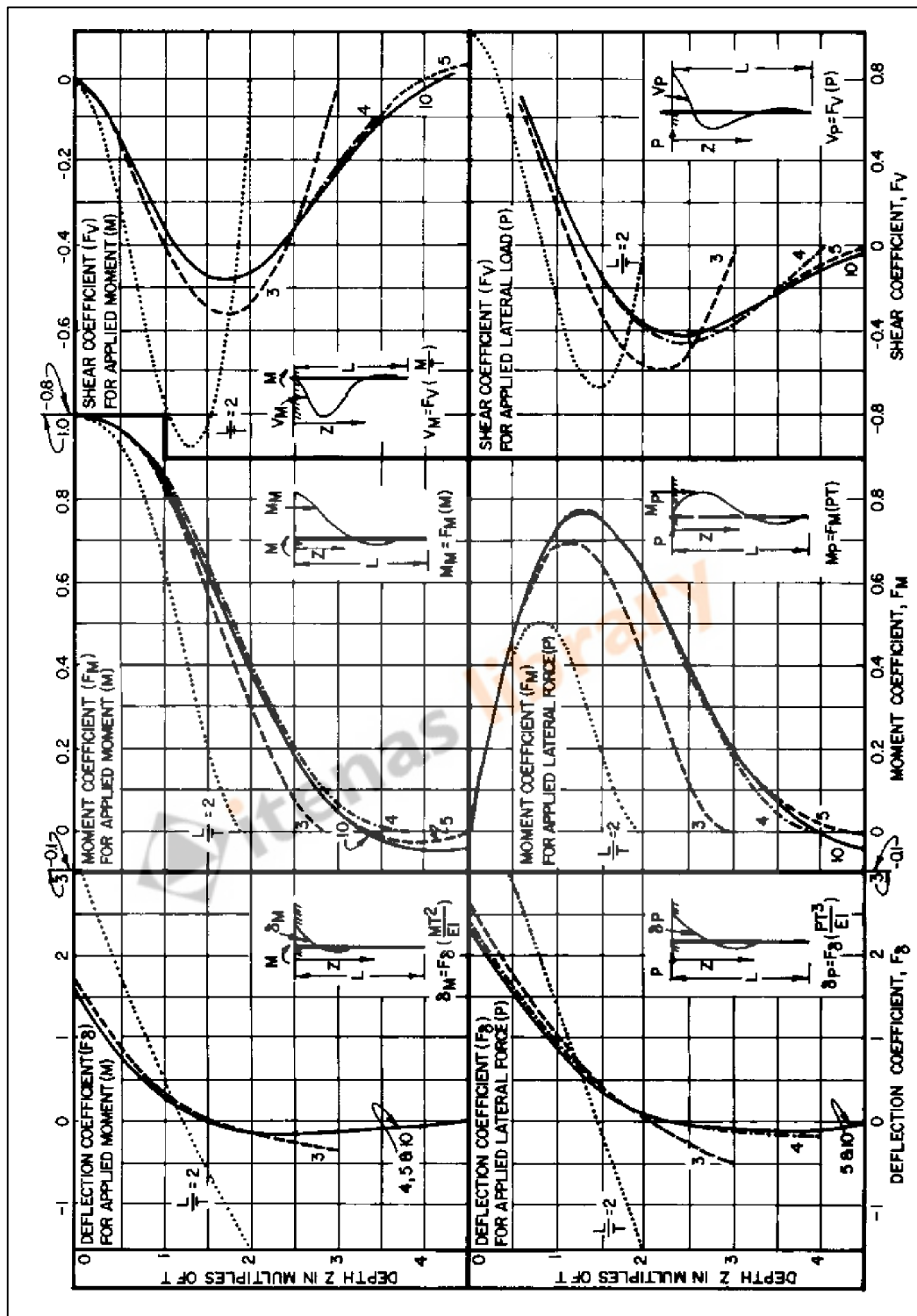
Gambar 2.14 Kurva Untuk Menentukan Nilai f Dari Berbagai Jenis Tanah

Sumber : NAVFAC DM-7 (1971)

| CASE I. FLEXIBLE CAP, ELEVATED POSITION | | |
|---|--|--|
| CONDITION | LOAD AT GROUND LINE | DESIGN PROCEDURE |
|  <p>n = NUMBER OF PILES</p> | <p>FOR EACH PILE:</p> $P = \frac{P_T}{n}$ $M = PH$  <p>DEFLECTED POSITION</p> | <p>FOR DEFINITION OF PARAMETERS SEE FIGURE 12</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. COMPUTE RELATIVE STIFFNESS FACTOR. $T = \left(\frac{EI}{P} \right)^{1/5}$ 2. SELECT CURVE FOR PROPER $\frac{L}{T}$ IN FIGURE 11. 3. OBTAIN COEFFICIENTS F_δ, F_M, F_V AT DEPTHS DESIRED. 4. COMPUTE DEFLECTION, MOMENT AND SHEAR AT DESIRED DEPTHS USING FORMULAS OF FIGURE 11. <p>NOTE: "f" VALUES FROM FIGURE 9 AND CONVERT TO LB/IN³.</p> |
| CASE II. PILES WITH RIGID CAP AT GROUND SURFACE | | |
|  |  | <ol style="list-style-type: none"> 1. PROCEED AS IN STEP 1, CASE I. 2. COMPUTE DEFLECTION AND MOMENT AT DESIRED DEPTHS USING COEFFICIENTS F_δ, F_M AND FORMULAS OF FIGURE 12. 3. MAXIMUM SHEAR OCCURS AT TOP OF PILE AND EQUALS $P = \frac{P_T}{n}$ IN EACH PILE. |
| CASE III. RIGID CAP, ELEVATED POSITION | | |
|  | <p>DEFLECTED POSITION</p>  | <ol style="list-style-type: none"> 1. ASSUME A HINGE AT POINT A WITH A BALANCING MOMENT M APPLIED AT POINT A. 2. COMPUTE SLOPE θ_2 ABOVE GROUND AS A FUNCTION OF M FROM CHARACTERISTICS OF SUPERSTRUCTURE. 3. COMPUTE SLOPE θ_1 FROM SLOPE COEFFICIENTS OF FIGURE 13 AS FOLLOWS: $\theta_1 = F_\theta \left(\frac{PT^2}{EI} \right) + F_\theta \left(\frac{MT}{EI} \right)$ 4. EQUATE $\theta_1 = \theta_2$ AND SOLVE FOR VALUE OF M. 5. KNOWING VALUES OF P AND M, SOLVE FOR DEFLECTION, SHEAR, AND MOMENT AS IN CASE I. <p>NOTE: IF GROUND SURFACE AT PILE LOCATION IS INCLINED, LOAD P TAKEN BY EACH PILE IS PROPORTIONAL TO I/H_0^3.</p> |

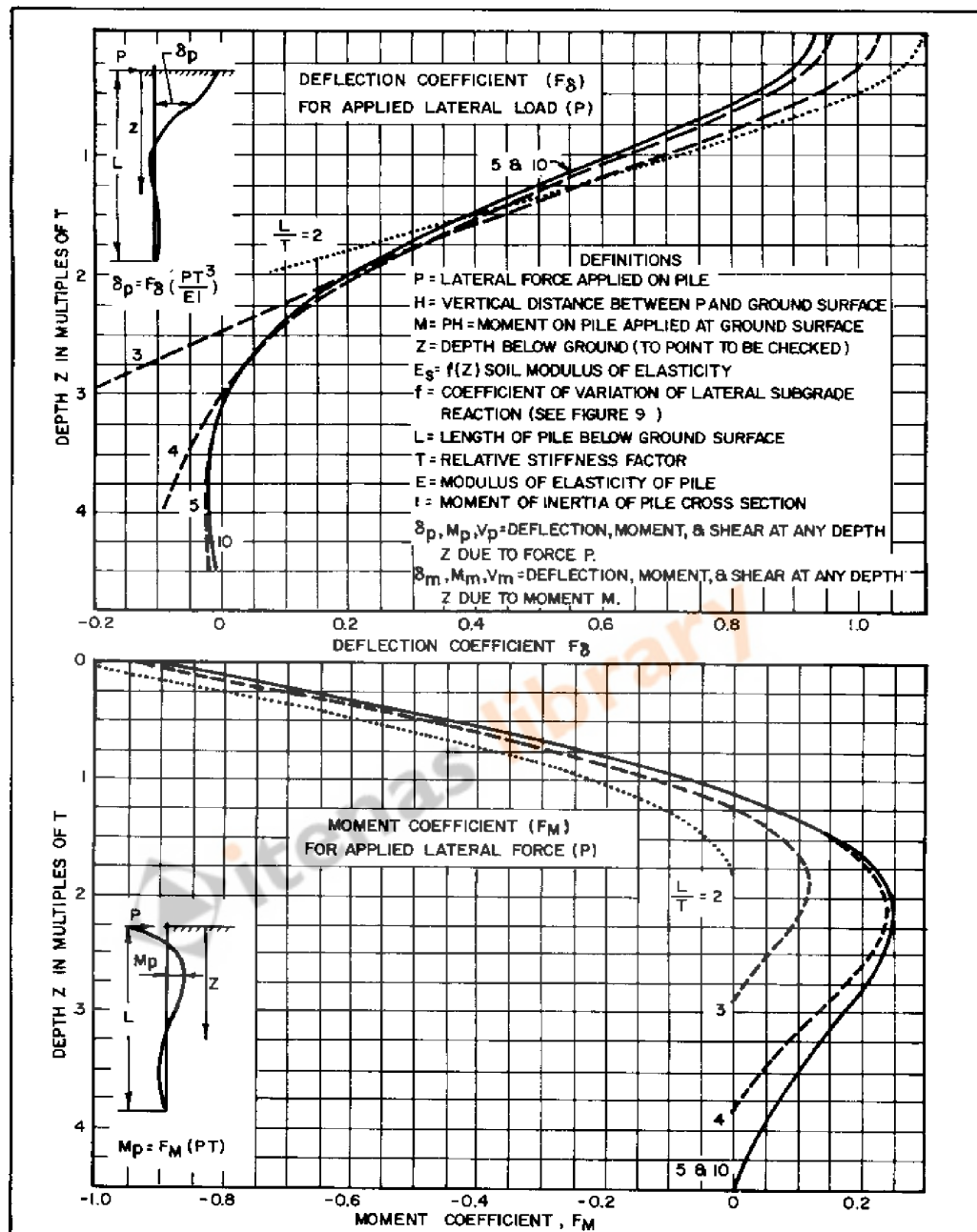
Gambar 2.15 Prosedur Desain untuk Masing-Masing Kondisi

Sumber : NAVFAC DM-7, 1971



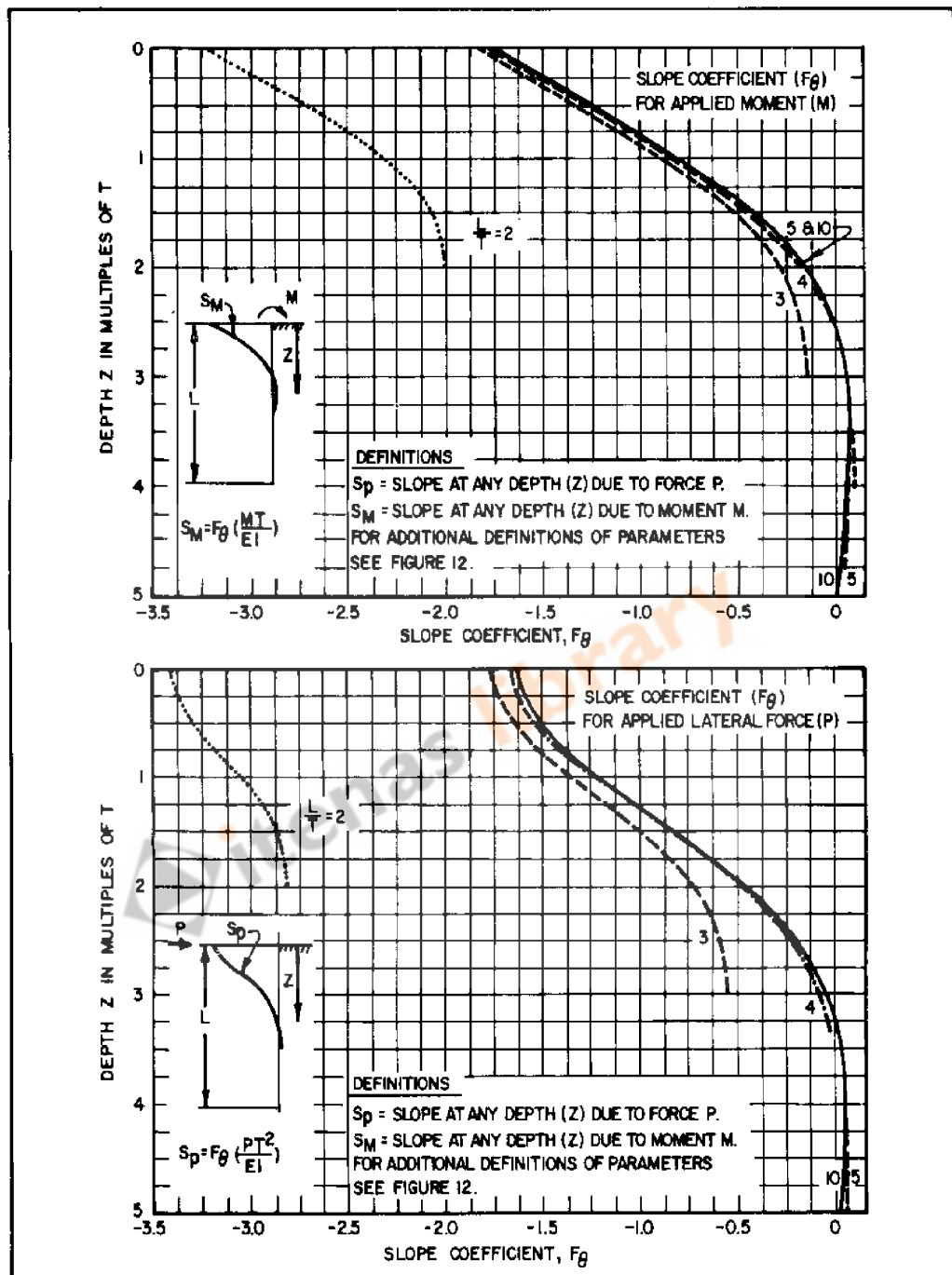
Gambar 2.16 Koefisien-Koefisien untuk Tiang Pancang yang Menerima Beban Lateral pada Kondisi I

Sumber : NAVFAC DM-7, 1971



Gambar 2.17 Koefisien-Koefisien untuk Tiang Pancang yang Menerima Beban Lateral pada Kondisi II

Sumber : NAVFAC DM-7, 1971



Gambar 2.18 Koefisien-Koefisien untuk Tiang Pancang yang Menerima Beban Lateral pada Kondisi III

Sumber : NAVFAC DM-7, 1971

2.9 Plaxis 2D (Berbasis Elemen Hingga)

Plaxis adalah program elemen hingga untuk aplikasi geoteknik di mana digunakan model-model tanah untuk melakukan simulasi terhadap perilaku dari tanah. Pengembangan plaxis dimulai pada tahun 1987 di Universitas Teknik Delft (*Technical University of delft*) inisiatif Departemen tenaga Kerja dan Pengelolaan Sumber Daya Air Belanda (*Dutch Departemen of Public Works and Water Management*).

Metode elemen hingga (*finite element method*) adalah metode perhitungan yang didasarkan pada konsep diskretisasi, yaitu pembagian suatu sistem struktur, massa atau benda padat menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Pembagian ini memungkinkan sistem yang memiliki derajat kebebasan tidak terhingga menjadi derajat kebebasan terhingga. Metode elemen hingga juga merupakan metode pendekatan, semakin kecil pembagian elemen-elemen kecil semakin akurat perhitungan pendekatan melalui metode elemen hingga. Metode ini dapat digunakan untuk mengetahui deformasi ataupun tegangan yang terjadi pada suatu elemen yang disebabkan oleh distribusi beban atau gaya. Secara umum tahapan perhitungan menggunakan program Plaxis 2D terdiri dari:

1. Tahapan memasukan data (*input*)

Menjalankan suatu analisis berdasarkan metode elemen hingga dengan program Plaxis 2D, langkah pertama yaitu membuat sebuah model elemen hingga dan menentukan sifat-sifat material serta kondisi batasnya. Untuk membuat sebuah model elemen hingga yang lengkap, pengguna terlebih dahulu harus membuat sebuah model geometri 2D yang terdiri dari titik-titik, garis-garis dan komponen-komponen lainnya dalam bidang $x-y$. Penyusunan jaring elemen hingga dan penentuan sifat-sifat serta kondisi batas pada tiap elemen dilakukan secara otomatis oleh pembentuk jaring elemen di dalam Plaxis berdasarkan masukan dari model geometri. Prinsipnya pada tahap memasukan data meliputi gambaran kontur geometri, kemudian tambahkan perlapisan tanah, objek-objek struktural, geometri yang diperlukan untuk

memodelkan tahapan konstruksi, kemudian kondisi-kondisi batas dan diikuti dengan pembebanan.

2. Tahap perhitungan (*calculation*)

Program perhitungan memuat semua fasilitas untuk mendefinisikan dan memulai perhitungan elemen hingga. Tahapan perhitungan yang telah diselesaikan dengan sukses akan diindikasikan dengan *trick mark* berwarna hijau, sedangkan tahapan yang gagal diselesaikan akan diindikasikan dengan tanda silang berwarna merah.

3. Hasil perhitungan (*output*)

Hasil keluaran dari suatu perhitungan elemen hingga adalah perpindahan pada titik-titik tegangan. Selain itu, saat model elemen hingga mengikutsertakan elemen-elemen struktural, maka gaya-gaya struktural juga akan dihitung dalam elemen-elemen ini. Program keluaran memuat seluruh fasilitas untuk menampilkan hasil dari data masukan yang telah dibentuk serta hasil dari perhitungan elemen hingga.

Program Plaxis dilengkapi oleh beberapa fitur untuk meghadapi berbagai aspek struktur dan geoteknik. Ringkasan mengenai fitur-fitur dan uraian penting dalam Plaxis antara lain adalah sebagai berikut:

1. Pembentukan model geometri secara grafis

Masukan berupa perlapisan tanah, elemen-elemen struktur, tahapan konstruksi, pembebanan serta kondisi-kondisi batas dilakukan dengan menggunakan prosedur grafis yang mudah dengan bantuan komputer, yang memungkinkan pembuatan model geometri berupa penampang melintang yang mendetail. Dari model geometri ini jaring elemen hingga 2D dapat dengan mudah dibentuk.

2. Pembentukan jaring elemen secara otomatis

Plaxis secara otomatis akan membentuk jaring elemen hingga 2D yang acak daengan pilihan untuk memperhalus jaring elemen secara global maupun lokal.

3. Pelat

Elemen pelat dapat digunakan untuk memodelkan lentur dari dinding penahan, lapisan terowongan, elemen cangkang serta struktur-struktur tipis lainnya. Perilaku dari elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan lentur, kekakuan arah normal penampang dan momen lentur batas. Sendi plastis dapat digunakan untuk elemen pelat yang bersifat elastoplastis saat momen batas termobilisasi. Elemen pelat dengan antarmuka dapat digunakan untuk melakukan analisis yang realistis dari struktur-struktur geoteknik.

4. Antarmuka (*Interface*)

Elemen antarmuka atau elemen penghubung dapat digunakan untuk memodelkan interaksi tanah dengan struktur. Sebagai contoh, elemen-elemen ini dapat digunakan untuk memodelkan zona tipis diantara lapisan terowongan dengan tanah disekelilingnya yang mengalami intensitas geser yang tinggi. Nilai sudut geser dan kohesi dari elemen antarmuka umumnya berbeda dengan nilai sudut geser dan kohesi dari tanah disekitarnya.

5. Baris Balok Tertanam (*Embedded Beam Rows*)

Elemen balok tertanam merupakan pendekatan yang disederhanakan untuk menangani deretan tiang dalam arah luar bidang dalam model regangan bidang 2D. Balok itu mewakili pergerakan deretan tiang di luar bidang dari masing-masing tiang. Kekakuan antarmuka harus dipilih sedemikian rupa sehingga menyumbang perbedaan antara perpindahan tanah dan perpindahan tiang dengan memindahkan beban dari struktur ke tanah dan sebaliknya. Baris balok tertanam dapat digunakan untuk memodelkan deretan struktural untuk mentransferkan beban ke tanah.

6. Tekanan air pori hidrostatik

Distribusi tekanan air pori yang kompleks dapat dihitung berdasarkan elevasi dari grafis freatik atau masukan langsung berupa nilai-nilai tekanan air. Sebagai alternatif, perhitungan aliran air statis dalam tanah dapat dilakukan untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada masalah-masalah aliran statis atau rembesan.

7. Material

a. Model Material

Plaxis mendukung berbagai model konstitutif untuk memodelkan perilaku dari material tanah maupun material kontinum lainnya. Berikut adalah sebagian pembahasan singkat dari model-model material tersebut:

1) Model Elastisitas Linier

Model ini menyatakan hukum Hooke tentang elastisitas linier isotropis. Model ini meliputi 2 (dua) buah parameter kekakuan, yaitu modulus Young (E) dan angka Poisson (ν).

2) Model Mohr-Coulomb

Model yang sangat dikenal ini digunakan untuk pendekatan awal terhadap perilaku tanah secara umum. Model ini meliputi 5 (lima) buah parameter utama, yaitu modulus Young (E), angka Poisson (ν), kohesi (c), sudut geser (ϕ) dan sudut dilatasi (ψ).

3) Model *Hardening Soil*

Model ini merupakan model hiperbolik yang bersifat elastoplastis, yang diformulasikan dalam lingkup plastisitas dari pengerasan akibat friksi (*friction hardening plasticity*). Model berderajat dua ini dapat digunakan untuk memodelkan perilaku tanah pasir, kerikil serta jenis tanah yang lebih lunak seperti lempung dan lanau.

4) Model *Soft Soil*

Model ini merupakan model *Cam-Clay* yang digunakan untuk memodelkan perilaku tanah lunak seperti lempung terkonsolidasi normal dan gambut. Penggunaan model ini harus dibatasi untuk situasi yang didominasi terutama oleh kompresi. Model ini tidak direkomendasikan untuk digunakan pada masalah galian.

b. Jenis Perilaku Material

Program Plaxis menyediakan pilihan berupa 3 (tiga) buah jenis perilaku untuk setiap model tanah sebagai berikut:

1) Perilaku terdrainase

Dengan perilaku ini maka tekanan air pori berlebih tidak akan dibentuk sama sekali. Perilaku ini jelas untuk diterapkan pada kasus tanah-tanah kering, kasus dimana terjadi drainase penuh akibat permeabilitas yang tinggi (tanah pasir) dan juga pada kasus dimana kecepatan pembebanan sangat rendah.

2) Perilaku tidak terdrainase

Perilaku ini digunakan untuk pembentukan tekanan air pori berlebih secara penuh. Aliran air pori terkadang dapat diabaikan karena permeabilitas yang sangat rendah (tanah lempungan) atau akibat kecepatan pembebanan yang sangat tinggi. Seluruh klaster yang dispesifikasikan sebagai tidak terdrainase akan benar-benar bersifat tidak terdrainase, meskipun klaster atau sebagian dari klaster tersebut berada di atas grafis freatik (muka air tanah).

3) Perilaku tidak porus

Dengan perilaku ini maka baik tekanan air pori awal maupun tekanan air pori berlebih tidak akan diperhitungkan sama sekali. Aplikasi dari perilaku ini adalah pada simulasi model material beton atau untuk perilaku objek struktural. Perilaku tidak porus sering dikombinasikan dengan penggunaan Model Linear Elastis.

8. Tampilan luaran (*Output*)

Program plaxis memiliki fitur-fitur grafis yang sangat baik untuk menampilkan hasil-hasil dari perhitungan. Nilai-nilai perpindahan, tegangan, regangan dan gaya-gaya dalam dari elemen struktural dapat diperoleh dari tabel keluaran. Keluaran berbentuk grafis maupun tabel dapat langsung dicetak, disimpan ke media penyimpanan ataupun langsung ke dalam memori *clipboard* untuk dapat digunakan dalam perangkat lain.

2.10 Penelitian Sebelumnya

Beberapa jurnal penelitian yang telah dilakukan sebelumnya digunakan dalam pencetus ide, membangun hipotesis awal, dan menjadi acuan pelaksanaan penelitian tugas akhir ini.

Doni Hidayat dan Gawit Hidayat (2015) dalam jurnalnya yang berjudul Analisa Kerusakan Abutmen Jembatan Koto Gasib Kabupaten Siak Provinsi Riau, abutmen pada jembatan tersebut mengalami keruntuhan rotasi karena adanya gaya lateral tanah yang terjadi pada tanah timbunan dan gaya aksial yang diterima oleh abutment sehingga menyebabkan pondasi mengalami defleksi. Analisa menggunakan batuan *software* Plaxis 2D dipatikan hasil, akibat tekanan tanah lateral aktif tanah timbunan mengakibatkan tiang pancang mengalami perpindahan total (displacement total) sebesar 1,98 meter untuk muka air -1,5 meter dibawah permukaan tanah, 4,84 meter untuk muka air -3 meter dibawah permukaan tanah dan 1,97 meter untuk tanah dasar yang diperkuat dengan dolken sehingga menyebabkan abutmen runtuh.

Proses keruntuhan yang terjadi pada abutment harus dianalisis oleh perencana dengan membandingkan faktor keamanan pada berbagai kondisi yang pembebanan yang diterima abutment. Sitti Hijraini Nur, Abd. Rahman Djameluddin dan Muhammad Zeid (2013) pada jurnalnya yang berjudul Stabilitas Abutment Di Atas Pondasi Sumuran Dan Tiang Pancang Pada Lapisan Tanah Lempung Lunak (Studi Kasus Jembatan Toddoppuli, Makassar) menunjukkan adanya penurunan nilai faktor keamanan dari kondisi tanah asli sebesar $SF = 2,703$, setelah ditambah tanah timbunan nilainya menurun menjadi $SF = 2,074$ dan setelah adanya abutment dan pondasi nilai $SF = 1,067$. Nilai faktor keamanan semakin menurun dan abutment mengalami keruntuhan setelah adanya beban alat berat dan beban tambahan struktur jembatan menjadi $SF = 0,914$. Oleh karena itu, perkuatan tanah pada area timbunan oprit menjadi salah satu faktor penting untuk agar abutment jembatan tidak mengalami keruntuhan.

Hafidh Baequnie (2015) dalam jurnalnya yang berjudul Perencanaan Abutment dan Badan Jalan Kereta Api STA 180+500 *Double Track* Madiun-Paron menyebutkan bahwa *geotextile* dapat digunakan untuk mencegah terjadinya kelongsoran timbunan, kemudian dalam hal mencegah pemampatan tanah dasar, *geotextile* berguna sebagai separator yang dapat mencegah bercampurnya timbunan pilihan dengan tanah dasar yang jelek. *Geotextile* juga mudah dalam

pelaksanaannya dan tidak memakan waktu yang lama dalam penginstalannya. Siti Nurlita Fitri (Fitri, 2016) dalam jurnalnya yang berjudul Perencanaan Abutment Jembatan, Oprit dan Perkuatan Tanah Dasar Di Bawah Oprit Jembatan Sungai Babakan Proyek Jalan Tol Pejagan Malang STA 270+469, alternatif yang digunakan untuk perkuatan timbunan oprit adalah Geotextile Wall yang berada dibelakang abutment. Perkuatan oprit dengan ketiggian oprit jembatan 4,6-7,1 m di belakang Abutment digunakan *Geotextile* UW250 sebanyak 10 lembar dengan jarak antar *geotextile* sebesar 0.4 m dan 2 buah micropile per meter.

Penelitian terdahulu yang membahas perkuatan *geotextile* untuk dinding tegak seperti halnya pada abutment dilakukan oleh Cut Meutia Corphyllia Frianvonsa Ratag (2018) dalam jurnalnya yang berjudul Analisis Dinding *Mechanically Stabilized Earth* (MSE) (Studi Kasus: Ruas Jalan Tol Manado Bitung Sta 6+475) menyebutkan bahwa variasi geogrid dengan panjang perkuatan dibawah 0.7H tidak memenuhi syarat kestabilan internal. Roski R.I. Legrans (2016) dalam jurnalnya yang berjudul Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Kestabilan Dinding MSE dengan Perkuatan Geotekstil di Daerah Reklamasi Malalayang menunjukkan bahwa jenis tanah pasir memberikan kapasitas tarik terbesar dibandingkan jenis tanah pasir berlanau dan lempung. Nilai sudut geser dalam (ϕ) yang besar memberikan nilai faktor gesekan tarik yang besar. Ini disebabkan tipe perkuatan geotekstil memiliki nilai faktor gesekan tarik yang bergantung pada nilai sudut geser dalam.

Tsukamoto (1999) meneliti pengaruh perkuatan geogrid pada tekanan lateral tanah di konstruksi dinding penahan tanah dengan membuat model berskala. Model tersebut berupa wadah berukuran 1,5 m panjang, 1,5 m lebar dan 1,05 m tinggi serta dibebani oleh beban luar tambahan. Hasil penelitian tersebut menyebutkan bahwa penambahan jumlah lapisan geogrid dapat menurunkan nilai koefisien tekanan lateral aktif (K_a). Kemudian, tekanan horizontal *geotextile* pada model dengan 5 *layer* geogrid lebih besar dari pada model dengan 3 *layer* geogrid.