

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Konsolidasi

3.1.1 Pendahuluan

Bila lapisan tanah jenuh berpermeabilitas rendah dibebani, maka tekanan air pori di dalam tanah tersebut segera bertambah. Perbedaan tekanan pori pada lapisan tanah, berakibat air mengalir ke lapisan tanah dengan tekanan air pori yang lebih rendah, yang diikuti penurunan tanahnya. Karena permeabilitas tanah yang rendah, proses ini membutuhkan waktu. Konsolidasi adalah proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanah. Proses konsolidasi dapat diamati dengan pemasangan *piezometer*, untuk mencatat perubahan tekanan air pori dengan waktunya. Besarnya penurunan dapat diukur dengan berpedoman pada titik referensi ketinggian pada tempat tertentu (Hardiyatmo, 2003).

3.1.2 Lempung *Normally Consolidated* dan *Overconsolidated*

Istilah *normally consolidated* dan *overconsolidated* digunakan untuk menggambarkan suatu sifat penting dari tanah lempung. Lapisan tanah lempung biasanya terjadi dari proses pengendapan. Selama proses pengendapan, lempung mengalami konsolidasi atau penurunan, akibat tekanan tanah yang berada di atasnya. Lapisan-lapisan tanah yang berada di atas ini suatu ketika mungkin kemudian hilang akibat proses alam. Hal ini berarti tanah lapisan bagian bawah pada suatu saat dalam sejarah geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat dari tekanan yang lebih besar dari tekanan yang bekerja sekarang. Tanah semacam ini disebut tanah *overconsolidated (OC)* atau terkonsolidasi berlebihan. Kondisi lain, bila tegangan efektif yang bekerja pada satu titik di dalam tanah pada waktu sekarang merupakan tegangan maksimumnya (atau tanah tidak pernah mengalami tekanan yang lebih besar dari tekanan pada waktu sekarang), maka lempung disebut pada kondisi *normally consolidated (NC)* atau terkonsolidasi normal.

Jadi, lempung pada kondisi *normally consolidated*, bila tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*) (p_c') sama dengan tekanan *overburden* efektif (p_o'). Sedang lempung pada *overconsolidated*, jika tekanan prakonsolidasi lebih besar dari tekanan *overburden* efektif yang ada pada waktu sekarang ($p_c' > p_o'$). Nilai banding *overconsolidation* (*Overconsolidation Ratio, OCR*) didefinisikan sebagai nilai banding tekanan prakonsolidasi terhadap tegangan efektif yang ada, atau bila dinyatakan dalam Persamaan 3.1 berikut ini.

$$OCR = \frac{P_c'}{P_o'} \quad (3.1)$$

Tanah *normally consolidated* mempunyai nilai $OCR = 1$, dan tanah *overconsolidated* bila mempunyai $OCR > 1$. Dapat ditemui pula, tanah lempung mempunyai $OCR < 1$. Dalam hal ini tanah adalah sedang mengalami konsolidasi (*underconsolidated*). Kondisi *underconsolidated* dapat terjadi pada tanah-tanah yang baru saja diendapkan baik secara geologis maupun oleh manusia. Dalam kondisi ini, lapisan lempung belum mengalami keseimbangan akibat beban di atasnya. Jika tekanan air pori diukur dalam kondisi *underconsolidated*, tekanannya akan melebihi tekanan hidrostatisnya.

3.1.3 Indeks Pemampatan (C_c) (*Compression Index*)

Indeks pemampatan atau indeks kompresi (C_c) adalah kemiringan dari bagian lurus grafik e - $\log p'$. Untuk dua titik yang terletak pada bagian lurus dari grafik dalam Gambar 3.1 nilai C_c dinyatakan oleh Persamaan 3.2 berikut ini.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2' - \log p_1'} = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{p_2'}{p_1'}\right)} \quad (3.2)$$

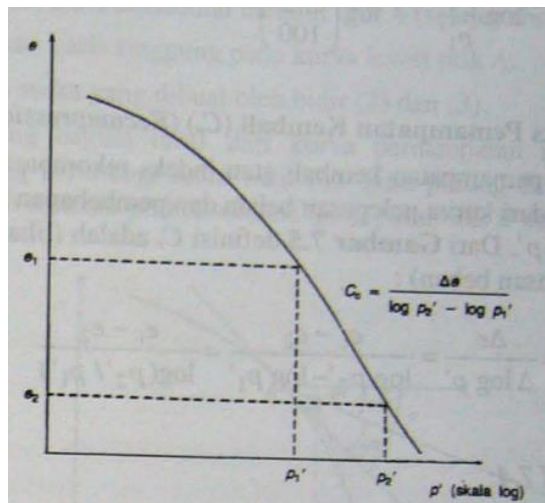
Dari penelitian, untuk tanah *normally consolidated*, Terzaghi dan Peck (1967) mengusulkan nilai C_c seperti pada Persamaan 3.3 berikut ini.

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \quad (3.3)$$

dengan LL adalah batas cair (*liquid limit*). Persamaan ini dapat digunakan untuk tanah lempung anorganik yang mempunyai sensitivitas rendah sampai sedang dengan kesalahan 30% (persamaan ini sebaiknya tidak digunakan untuk sensitivitas lebih besar dari 4).

Terzaghi dan Peck juga mengusulkan hubungan yang sama untuk tanah lempung dibentuk kembali (*remolded*) seperti pada Persamaan 3.4 dan gambar hubungan grafik indeks pemampatan, C_c dapat dilihat pada Gambar 3.1.

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \quad (3.4)$$



Gambar 3.1 Indeks Pemampatan, C_c
(Sumber : Hardiyatmo, 2003)

3.1.4 Koefisien Konsolidasi (C_v) (*Coefficient of Consolidation*)

Kecepatan penurunan konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan koefisien konsolidasi C_v . Kecepatan penurunan perlu diperhitungkan bila penurunan konsolidasi yang terjadi pada struktur diperkirakan besar. Bila penurunan sangat kecil, kecepatan penurunan sejalan dengan waktunya tidak menghasilkan perbedaan yang berarti.

Derajat konsolidasi pada sembarang waktu ditentukan dengan menggambarkan grafik penurunan *vs*, waktu untuk satu beban tertentu yang

diterapkan pada alat konsolidasi. Caranya dengan mengukur penurunan total pada akhir fase konsolidasi. Kemudian, dari data penurunan dan waktu sembarang waktu yang dihubungkan dengan derajat konsolidasi rata-rata tertentu (misalnya $U = 50\%$) ditentukan. Hanya sayangnya, walaupun fase konsolidasi telah berakhir, yaitu ketika tekanan air pori telah nol, benda uji di dalam alat konsolidasi masih terus mengalami penurunan akibat konsolidasi sekunder. Karena itu, tekanan air pori mungkin perlu diukur selama proses pembebanan atau suatu interpretasi data penurunan dan waktu harus di buat untuk menentukan kapan konsolidasi telah selesai.

Kecuali itu, jika sejumlah kecil udara terhisap masuk dalam air pori akibat penurunan tekanan pori dari lokasi aslinya di lapangan, kemungkinan terdapat juga penurunan yang berlangsung dengan cepat, yang bukan bagian dari proses konsolidasi. Karena itu, tinggi awal atau kondisi sebelum adanya penurunan saat permulaan proses konsolidasi juga harus diinterpretasikan.

3.1.5 Perhitungan Penurunan Konsolidasi

Ditinjau lapisan tanah lempung jenuh dengan tebal H . Akibat adanya beban yang bekerja, lapisan tanah menerima tambahan tegangan geser sebesar Δp . Dianggap regangan arah lateral nol. Pada akhir konsolidasi, terdapat tambahan tegangan efektif vertikal sebesar (Δp). Sebagai akibat penambahan tegangan dari p_0' ke p_1' (dengan $p_1' = p_0' + \Delta p$) terjadi pengurangan angka pori dari e_0 ke e_1 . Pengurangan volume persatuan volume lempung dinyatakan oleh persamaan angka pori pada Persamaan 3.5.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (3.5)$$

dengan :

V = volume awal

H = tebal lapisan tanah awal

ΔV = perubahan volume

ΔH = perubahan tebal

e_0 = angka pori awal

e_1 = angka pori pada perubahan volume tertentu

Δe = perubahan angka pori

Karena regangan lateral nol, pengurangan volume per volume satuan sama dengan pengurangan tebal persatuan tebalnya, yaitu penurunan persatuan ketinggian atau panjangnya. Besarnya penurunan lapisan tanah setebal dh dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.6 di bawah ini.

$$\begin{aligned} dS_c &= \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} dh & (3.6) \\ &= \frac{e_0 - e_1}{p'_1 - p_{0'}} \frac{p'_1 - p_{0'}}{1 + e_0} dh \\ &= m_v \Delta p dh \end{aligned}$$

dengan S_c adalah penurunan konsolidasi primer total atau ultimit. Untuk penurunan lapisan tanah dengan tebal H , maka persamaan menjadi seperti Persamaan 3.7.

$$S_c = \int_0^H m_v \Delta p dh \quad (3.7)$$

Jika m_v dan Δp dianggap sama pada sembarang kedalaman tanah, maka diperoleh persamaan penurunan konsolidasi primer total seperti Persamaan 3.8.

$$S_c = m_v \Delta p H \quad (3.8)$$

Bila akan menghitung besarnya penurunan konsolidasi dengan menggunakan nilai m_v dan Δp , maka pada sembarang kedalaman lapisan yang ditinjau nilai keduanya ditentukan, dan penurunan dihitung dengan menambahkan secara aljabar dari penurunan tiap lapisan. Nilai tambahan regangan Δp dapat ditentukan dengan memperhatikan distribusi tegangan akibat beban fondasi pada setiap lapisan yang ditinjau. Penurunan konsolidasi primer total adalah jumlah dari penurunan tiap lapisannya, yaitu pada Persamaan 3.9.

$$S_c = \sum m_{vi} \Delta p_i \Delta H \quad (3.9)$$

Persamaan konsolidasi dengan menggunakan grafik e -log p' adalah sebagai berikut ini.

Pada persamaan (3.9), bila $\Delta H = S_c$, maka dapat dibuat persamaan umum menjadi seperti Persamaan 3.10.

$$S_c = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \quad (3.10)$$

Untuk lempung tertentu, penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut ini.

Bila didefinisikan seperti Persamaan 3.11.

$$p_1' = p_0' + \Delta p \quad (3.11)$$

1. Penurunan untuk lempung *normally consolidated* ($p_c' = p_0'$) dengan tegangan efektif sebesar p_1' seperti pada Persamaan 3.12.

$$S_c = C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \quad (3.12)$$

2. Penurunan lempung *overconsolidated* ($p_c' > p_0'$) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai p_1' seperti pada Persamaan 3.13 dan Persamaan 3.14.

a. Bila, $p_1' < p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_1'}{p_0'} \quad (3.13)$$

b. Bila, $p_1' > p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_1'}{p_0'} + C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_1'}{p_c'} \quad (3.14)$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} ; \text{ pada kurva penambahan beban atau pada } p' > p_c'$$

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} ; \text{ pada kurva pelepasan beban atau pada } p' < p_c'$$

dengan :

C_r = indeks pemampatan kembali

C_c = indeks pemampatan

H = tebal lapisan tanah

P_c' = tekanan prakonsolidasi

e_0 = angka pori awal

Δp = tambahan tegangan akibat beban fondasi

P_0' = tekanan *overburden* efektif mula-mula sebelum dibebani

Untuk perhitungan waktu konsolidasi yang terjadi, maka rumus yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan 3.15.

$$T = \frac{T_v \times H^2}{C_v} \quad (3.15)$$

dengan :

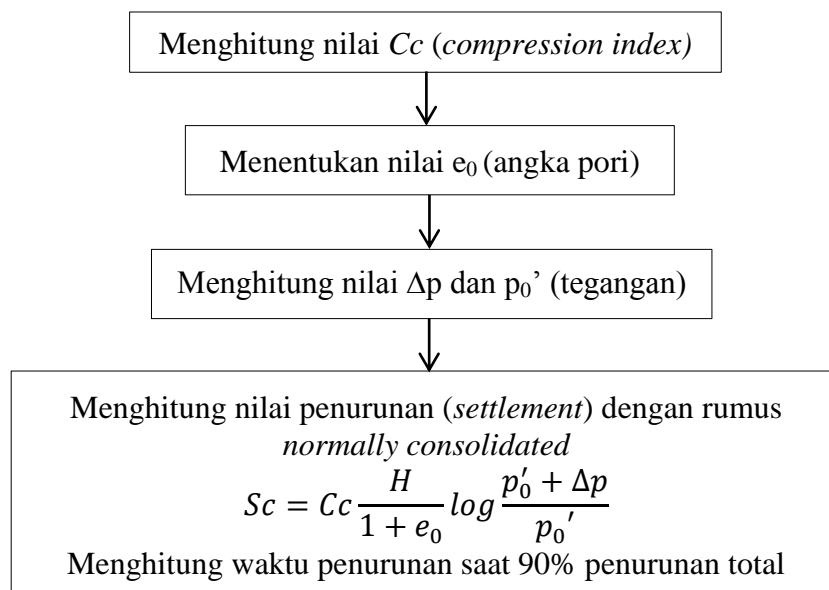
T = waktu penurunan

H = tebal lapisan

C_v = koefisien konsolidasi

T_v = faktor waktu (*time factor*)

Untuk prosedur perhitungan konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Bagan Alir Perhitungan Penurunan Konsolidasi

3.2 *Preloading* (Pembebanan Awal)

3.2.1 Prapembebanan (*Preloading*)

Pada tanah yang lunak, mudah mampat dan tebal, kadang-kadang dibutuhkan untuk mengadakan pembebanan sebelum pelaksanaan bangunannya sendiri. Cara ini disebut *prapembebanan (preloading)*. Maksud dari prapembebanan ini adalah untuk meniadakan atau mereduksi penurunan konsolidasi primer, yaitu dengan membebani tanah lebih dulu sebelum pelaksanaan bangunan. Setelah penurunan konsolidasi primer selesai atau sangat kecil, baru beban tanah dibongkar dan struktur dibangun di atas tanah tersebut. Keuntungan dari prapembebanan, kecuali mengurangi penurunan juga menambah kuat geser tanah. Pada pengerjaan timbunan tanah untuk jalan raya, cara prapembebanan dapat dilaksanakan dengan melebihkan tinggi timbunan, setelah penurunan konsolidasi sangat kecil, kemudian kelebihan tinggi timbunan dibongkar. Cara ini banyak digunakan dalam proyek-proyek besar (Johnson, 1970).

3.2.2 Metode Percepatan Pemampatan dengan *Preloading*

Perbaikan tanah dengan teknik ini terutama ditujukan untuk tanah-tanah yang mengalami penurunan yang besar bila dibebani. Memampatkan tanah yang lembek dan “*compressible*” (mudah mampat) dapat menyebabkan peningkatan kekuatan tanah (daya dukung tanah), karena tanah yang memampat mempunyai struktur susunan partikel yang lebih rapat dan lebih kokoh.

Pada prinsipnya bangunan tidak boleh dibangun di atas tanah yang *compressible*. Untuk itu perlu memampatkan tanah sebelum bangunan didirikan dengan tujuan pokoknya adalah sebagai berikut.

1. Menghilangkan sama sekali (atau sebagian besar), penurunan konsolidasi yang akan terjadi akibat beban bangunan tersebut. Bila total penurunan tanah yang dicapai sesuai dengan yang direncanakan, beban awal tersebut dapat dihilangkan (dibongkar). Baru kemudian bangunan yang sebenarnya dapat dilaksanakan.

2. Meningkatkan daya dukung (tahanan geser = *shear strength*) dari tanah dasar. Pemampatan dapat meningkatkan tahanan geser tanah sehingga tanah yang semula lunak dan mempunyai daya dukung yang rendah menjadi lebih kuat dan lebih stabil dalam mendukung beban bangunan.

Perbaikan tanah cara pemampatan awal ini umumnya cocok untuk tanah lempung organik dan tanah peat.

3.2.3 Distribusi Tegangan di Dalam Tanah (Teori *Boussinesq*) Beban Terbagi Rata Berbentuk Trapesium Memanjang Tak Terhingga

Dalam menentukan tambahan tegangan vertikal yang terjadi akibat beban terbagi rata berbentuk trapesium dengan panjang tak terhingga, ditinjau titik A di dalam tanah yang mengalami pembebanan akibat beban terbagi rata berbentuk trapesium yang dapat dilihat pada Gambar 3.3a. Tegangan pada titik A ekuivalen dengan tegangan akibat beban yang diperlihatkan pada Gambar 3.3b dikurangi dengan tegangan di A akibat beban pada Gambar 3.3c. Dari Persamaan 3.16 tegangan pada titik A akibat beban pada Gambar 3.3b adalah sebagai berikut.

$$\frac{q + \left(\frac{b}{a}\right)q}{\pi} (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (3.16)$$

Tegangan pada titik A akibat beban pada Gambar 3.3c adalah sebagai berikut pada Persamaan 3.17.

$$\left(\frac{b}{a}q\right) \frac{1}{\pi} \alpha_2 \quad (3.17)$$

Jadi tambahan tegangan vertikal akibat beban pada Gambar 3.3a adalah seperti pada Persamaan 3.18, Persamaan 3.19 dan Persamaan 3.20.

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{a+b}{a} \right\} (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \quad (3.18)$$

atau

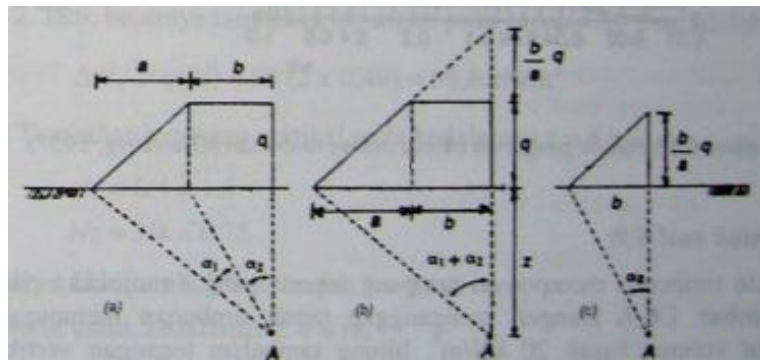
$$\Delta\sigma_z = qI \quad (3.19)$$

dengan

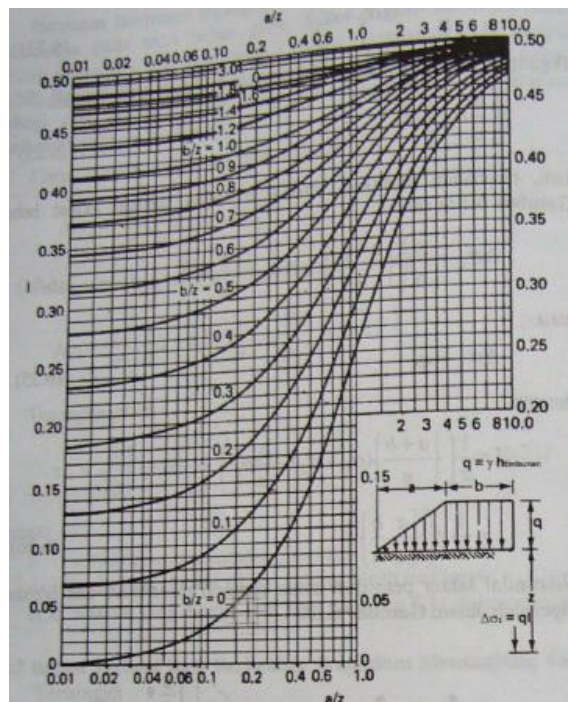
$$I = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{a+b}{a} \right\} (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2$$

$$= \frac{1}{\pi} f \left(\left\{ \frac{a}{z}, \frac{b}{z} \right\} \right) \quad (3.20)$$

Nilai-nilai faktor pengaruh untuk berbagai macam a/z dan b/z dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Tambahan Tegangan Vertikal Akibat Beban Timbunan
(Sumber : Hardiyatmo, 2003)



Gambar 3.4 Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan (Osterberg, 1957)
(Sumber : Hardiyatmo, 2003)

3.3 *Plaxis*

3.3.1 Pendahuluan

PLAXIS adalah salah satu program aplikasi komputer berdasarkan metode elemen hingga dua dimensi yang digunakan secara khusus untuk menganalisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai aplikasi dalam bidang geoteknik, seperti daya dukung tanah. Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang (*plane-strain*) maupun secara *axisymmetric*. Program ini menerapkan model antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisis. Program ini terdiri dari empat buah sub-program yaitu masukan, perhitungan, keluaran, dan kurva.

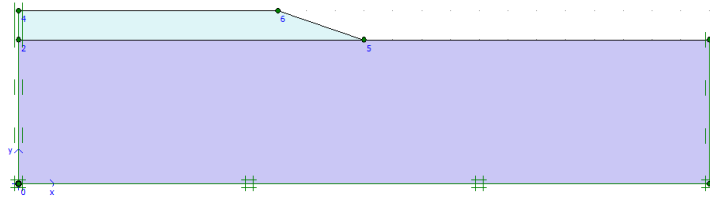
Plane-strane digunakan untuk menganalisis struktur yang memiliki potongan melintang dengan pembebanan dan kondisi tegangan yang seragam dan perpindahan/deformasi pada arah ini dianggap nol. Sedangkan *axisymmetric* digunakan untuk analisis struktur lingkaran (*circular structures*) yang memiliki potongan radial dan pembebanan seragam terhadap pusat, dengan deformasi dan tegangan yang dianggap sama pada arah radialnya.

Kondisi di lapangan yang disimulasikan ke dalam program *PLAXIS* ini bertujuan untuk mengimplementasikan tahapan pelaksanaan di lapangan ke dalam tahapan pengerjaan pada program, dengan harapan pelaksanaan di lapangan dapat didekati sedekat mungkin pada program, sehingga respon yang dihasilkan dari program dapat diasumsikan sebagai cerminan dari kondisi yang sebenarnya terjadi di lapangan.

3.3.2 Perhitungan dengan Software *PLAXIS*

Pemodelan *finite element* dengan aplikasi *software PLAXIS* dipergunakan untuk melakukan perhitungan deformasi selama konstruksi pada timbunan di atas tanah lunak. Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut.

1. Memodelkan geometri tanah, ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Input Geometri

2. Memberikan kondisi batas (*boundary condition*) terhadap lapisan tanah menggunakan *standard fixities*. Maksud dari *standard fixities* adalah sebagai berikut.
 - a. Batas kiri dan kanan bersifat *horizontally fixed*, artinya pada bagian ini lapisan tanah tidak mengalami *displacement* arah horizontal tetapi dalam arah vertikal saja.
 - b. Batas bawah bersifat *horizontally fixed* dan *vertically fixed*, artinya pada bagian ini tanah tidak mengalami deformasi vertikal maupun horizontal.
 - c. Batas atas bersifat *free*, artinya pada bagian ini dapat mengalami deformasi vertikal maupun horizontal.
3. Membentuk mesh lapisan tanah dan timbunan (*mesh generation*). *Mesh generated* merupakan pembagian struktur menjadi elemen-elemen *cluster* dan titik-titik nodal elemen (*nodes*). Kegunaan *mesh* ini adalah untuk melakukan perhitungan dalam metode elemen hingga.
4. Menentukan kondisi air tanah (*groundwater condition*).
5. Menentukan konfigurasi awal dari mesh (*initial mesh generation*), karena konstruksi timbunan merupakan beban yang dilakukan bertahap maka konfigurasi awal dari mesh perlu dispesifikasikan dahulu atau mesh untuk timbunan tidak diaktifkan dahulu.
6. Menghitung tegangan-tegangan awal (*initial stress*). Tegangan efektif dan tekanan air pori pada kondisi awal dihitung dahulu.
7. Menspesifikasikan titik yang ditinjau. Hal ini dilakukan untuk mengetahui besarnya deformasi dan tekanan air pori yang terjadi.
8. Melakukan perhitungan dengan tahapan sebagai berikut.
 - a. Fase 1 – tanah asli tanpa timbunan

general – calculation type : *plastic*

parameters – loading input : *staged construction*

define – timbunan dihilangkan

b. Fase 2 – aktifkan timbunan

general – calculation type : *plastic*

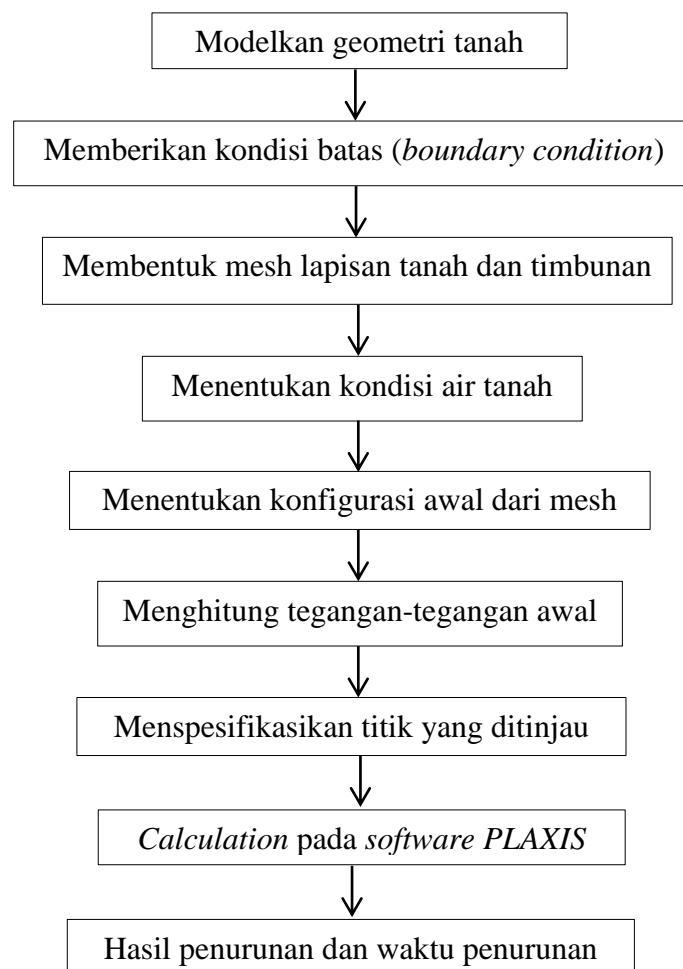
parameters – loading input : *staged construction*

define – timbunan diaktifkan

c. Fase 3 – *consolidation*

general – calculation type : *consolidation*

Untuk bagan alir perhitungan dengan *software PLAXIS* dapat dilihat pada Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3.6 Bagan Alir Pehitungan dengan *software PLAXIS*