

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Umum**

Proyek konstruksi diawali dengan tahap perencanaan. Salah satu contoh dari tahap perencanaan adalah analisis terhadap struktur atas bangunan dalam proyek konstruksi. Peninjauan struktur atas ini perlu dilakukan untuk mengetahui pembebanan yang ada pada struktur. Pembebanan pada struktur ini selanjutnya akan dipakai untuk merancang fondasi sehingga fondasi mampu memikul beban struktur yang ada di atasnya. Selain pertimbangan pembebanan struktur atas, perancangan suatu fondasi perlu mempertimbangkan parameter tanah di sekitar proyek konstruksi sehingga struktur tidak mengalami keruntuhan.

#### **2.2 Tanah**

Tanah didefinisikan sebagai agregat kasar dari butiran mineral dan bahan organik dengan cairan dan gas pada ruang kosong di antara partikel padat. Tanah digunakan sebagai bahan konstruksi di berbagai proyek teknik sipil dan digunakan sebagai pendukung fondasi struktural. Pada pekerjaan konstruksi seperti pekerjaan fondasi perlu dilakukan penyelidikan tanah untuk mengetahui karakteristik dari tanah yang akan dipakai untuk pendukung fondasi yang akan memikul beban struktur yang ada di atasnya. Penyelidikan tanah dilakukan untuk mendapatkan karakteristik tanah seperti distribusi ukuran butiran, permeabilitas tanah, kompresibilitas tanah, kekuatan geser tanah, kohesi tanah, modulus elastisitas tanah, dan kapasitas untuk menahan beban (sumber : Braja M. Das,2016).

##### **2.2.1 Berat Isi Tanah**

Berat isi partikel adalah perbandingan antara massa total fase padat tanah dan volume fase padat. Berat jenis partikel diperlukan untuk mengetahui kepadatan dalam tanah. Berat jenis tanah dapat diperoleh melalui pengujian laboratorium dengan membandingkan berat (W) dan volume (V) dari tanah yang akan diuji.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.1)$$

Pada beberapa kondisi dimana data hasil pengujian laboratorium diragukan karena hasil pengujian bertolak belakang dengan teori geoteknik yang ada. Berat isi suatu tanah dapat diperoleh melalui korelasi. **Tabel 2.1** menunjukkan nilai korelasi berat jenis tanah, porositas, dan nilai pori berdasarkan jenis tanah.

**Tabel 2. 1** Nilai korelasi berat jenis tanah, porositas, dan nilai pori berdasarkan jenis tanah

| No. | Description of Soil                | Porosity<br>(n)<br>% | Void<br>Ratio<br>(e) | Water<br>Content<br>(w)<br>% | Unit<br>Weight<br>kN/m <sup>3</sup> |                |
|-----|------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------|
|     |                                    |                      |                      |                              | $\gamma_d$                          | $\gamma_{sat}$ |
| 1.  | <i>Uniform sand, loose</i>         | 46                   | 0.85                 | 32                           | 14.0                                | 18.5           |
| 2.  | <i>Uniform sand, loose</i>         | 34                   | 0.51                 | 19                           | 17.0                                | 20.5           |
| 3.  | <i>Mixed-grained sand, loose</i>   | 40                   | 0.67                 | 25                           | 15.6                                | 19.5           |
| 4.  | <i>Mixed-grained sand, dense</i>   | 30                   | 0.43                 | 16                           | 18.2                                | 21.2           |
| 5.  | <i>Glacial till, mixed grained</i> | 20                   | 0.25                 | 9                            | 20.8                                | 22.7           |
| 6.  | <i>Soft glacial clay</i>           | 55                   | 1.20                 | 45                           | 11.9                                | 17.3           |
| 7.  | <i>Soft glacial clay</i>           | 37                   | 0.60                 | 22                           | 16.7                                | 20.3           |
| 8.  | <i>Soft slightly organic clay</i>  | 66                   | 1.90                 | 70                           | 9.1                                 | 15.5           |
| 9.  | <i>Soft highly organic clay</i>    | 75                   | 3.00                 | 110                          | 6.8                                 | 14.0           |
| 10. | <i>Soft bentonite</i>              | 84                   | 5.20                 | 194                          | 4.2                                 | 12.4           |

(Sumber : V. N. S. Murthy, 2002)

**Tabel 2. 2** Nilai korelasi berat jenis tanah berdasarkan jenis tanah

| No. | Description of Soil              | Unit Weight<br>kN/m <sup>3</sup> |                |
|-----|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
|     |                                  | $\gamma_d$                       | $\gamma_{sat}$ |
| 1.  | GP – <i>Poorly graded gravel</i> | 17,5 – 20,5                      | 19,5 – 22,0    |
| 2.  | GW – <i>Well graded gravel</i>   | 17,5 – 22,0                      | 19,5 – 23,5    |
| 3.  | GM – <i>Silty gravel</i>         | 16,0 – 20,5                      | 19,5 – 22,0    |
| 4.  | GC – <i>Clayey gravel</i>        | 16,0 – 20,5                      | 19,5 – 22,0    |
| 5.  | SP – <i>Poorly graded sand</i>   | 15,0 – 19,5                      | 19,0 – 21,0    |
| 6.  | SW – <i>Well graded sand</i>     | 15,0 – 21,0                      | 19,0 – 23,0    |
| 7.  | SM – <i>Silty sand</i>           | 12,5 – 21,0                      | 17,5 – 22,0    |
| 8.  | SC – <i>Clayey sand</i>          | 13,5 – 20,5                      | 17,5 – 21,0    |
| 9.  | ML – <i>Low plasticity silt</i>  | 11,5 – 17,5                      | 12,5 – 20,5    |
| 10. | MH – <i>High plasticity silt</i> | 11,5 – 17,5                      | 11,5 – 20,5    |
| 11. | CL – <i>Low plasticity clay</i>  | 12,5 – 17,5                      | 11,5 – 20,5    |
| 12. | CH – <i>High plasticity clay</i> | 12,5 – 17,5                      | 11,5 – 19,5    |

(Sumber : Donal P. Coduto. 2001)

Selain berdasarkan jenis tanah, berat jenis tanah juga dapat dikorelasikan melalui nilai SPT tanah seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.3**.

**Tabel 2.3** Korelasi N-SPT dengan berat jenis tanah

| <i>Cohesionless Soil</i> |                  |               |               |                   |             |
|--------------------------|------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------|
| N                        | 0 - 10           | 11 - 30       | 31 - 50       | >50               |             |
| <i>Unit weight</i>       | 12 - 16          | 14 - 18       | 16 - 20       | 18 - 23           |             |
| <i>Angle of friction</i> | 25 - 32          | 28 - 36       | 30 - 40       | > 35              |             |
| <i>State</i>             | <i>Loose</i>     | <i>Medium</i> | <i>Dense</i>  | <i>Very Dense</i> |             |
| <i>Cohesive Soil</i>     |                  |               |               |                   |             |
| N                        | <4               | 4 - 6         | 6 - 15        | 16 - 25           | >25         |
| <i>Unit weight</i>       | 14 - 18          | 16 - 18       | 16 - 18       | 16 - 20           | > 20        |
| qu                       | <25              | 20 - 50       | 30 - 60       | 40 - 200          | >100        |
| <i>Consistency</i>       | <i>Very Soft</i> | <i>Soft</i>   | <i>Medium</i> | <i>Stiff</i>      | <i>Hard</i> |

### 2.2.2 Sudut Geser Dalam ( $\phi$ ) dan Kohesi Tanah (c)

Kekuatan geser dari suatu tanah adalah tahanan dalam per satuan luas dari massa tanah yang dapat menahan keruntuhan dan geser sepanjang bidang tanah tersebut. Mohr (1900) menyatakan bahwa suatu material mengalami kegagalan akibat kombinasi dari tegangan normal dan tegangan geser. Pada permasalahan mekanika tanah, tegangan geser pada tanah didapatkan dengan menganggap tegangan geser sebagai fungsi linier dari tegangan normal (Coulomb, 1776). Fungsi linier ini dituliskan pada **persamaan 2.2** dimana persamaan ini dikenal dengan *Mohr-Coulomb failure criterion*.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

Dimana :  $\tau_f$  = tegangan geser

c = kohesi

$\sigma$  = tegangan normal

$\phi$  = sudut geser dalam

Nilai kohesi ( $c_u$ ) dapat diperoleh melalui korelasi Stroud yaitu dengan menggunakan **persamaan 2.3** sebagai berikut :

$$c_u = (3,5 - 6,5) N - SPT \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (2.3)$$

Pada tanah jenuh dimana seluruh pori pada tanah terisi dengan air, total tegangan normal dapat dihitung dengan menumlahkan nilai tegangan efektif dengan tekanan air pori (**persamaan 2.4**).

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.4)$$

Nilai sudut geser dalam dan kohesi suatu tanah diperoleh melalui pengujian laboratorium seperti *direct shear* dan *triaxial*. Pada beberapa kondisi dimana pengujian ini tidak dapat dipercaya atau tidak sesuai dengan teori yang ada. Nilai kohesi efektif dan sudut geser dalam dapat diperoleh melalui korelasi seperti ditunjukkan pada **Tabel 2.4** dan **Tabel 2.5**.

**Tabel 2. 4** Korelasi jenis tanah dengan nilai sudut geser dalam

| Description | Relative density (Dr) | Corrected SPT – N (blows/300mm) |                            |                            | Strength      |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
|             |                       | Fine sand                       | Medium                     | Coarse sand                |               |
| Very loose  | <15%                  | (No) <sub>60</sub> ≤ 3          | (No) <sub>60</sub> ≤ 3     | (No) <sub>60</sub> ≤ 3     | φ < 28°       |
| Loose       | 15-35%                | (No) <sub>60</sub> = 3-7        | (No) <sub>60</sub> = 3-8   | (No) <sub>60</sub> = 3-8   | φ = 28° - 30° |
| Med Dense   | 35-65%                | (No) <sub>60</sub> = 7-23       | (No) <sub>60</sub> = 8-25  | (No) <sub>60</sub> = 8-27  | φ = 30° - 40° |
| Dense       | 65-85%                | (No) <sub>60</sub> = 23-40      | (No) <sub>60</sub> = 25-43 | (No) <sub>60</sub> = 27-47 | φ = 40° - 45° |
| Very Dense  | >85%                  | (No) <sub>60</sub> > 40         | (No) <sub>60</sub> > 43    | (No) <sub>60</sub> > 47    | φ = 45° - 50° |
|             | 100%                  | (No) <sub>60</sub> = 55         | (No) <sub>60</sub> = 60    | (No) <sub>60</sub> = 65    | φ = 50°       |

Sumber : Burt G. Look, 2007

**Tabel 2. 5** Korelasi jenis tanah dengan nilai sudut geser dalam dan kohesi

| Type     | Soil description   | Effective cohesion (kPa) | Friction angle (degrees) |
|----------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Cohesive | Soft - Organic     | 5 – 10                   | 10 – 20                  |
|          | Soft – Non organic | 10 – 20                  | 15 – 25                  |
|          | Stiff              | 20 – 50                  | 20 – 30                  |
|          | Hard               | 50 - 100                 | 25 - 30                  |

Sumber : Burt G. Look, 2007

### 2.2.3 Modulus Elastisitas dan Poisson Ratio

Modulus elastisitas merupakan angka yang menunjukkan ketahanan suatu material terhadap deformasi ketika gaya diterapkan pada material tersebut sedangkan *poisson ratio* merupakan konstanta elastisitas yang diperoleh melalui perbandingan regangan aksial dan regangan transversal pada suatu material jika material tersebut diberikan gaya. Modulus elastisitas pada tanah pada umumnya

ditentukan melalui pengujian di laboratorium seperti *uncondined compression* dan *triaxial compression*. Selain pengujian di laboratorium, modulus elastisitas juga dapat ditentukan melalui pengujian di lapangan yaitu dengan pengujian *plate loading test* dan *pressuremeter test*. Das (1999) dan Bowles (1982) menyajikan suatu korelasi jenis tanah dengan modulus elastisitas pada tanah yang ditunjukkan pada **Tabel 2.6** dan **Tabel 2.7**.

**Tabel 2. 6** Korelasi jenis tanah dengan nilai modulus elastisitas dan *poisson ratio*

| <i>Soil type</i>         | <i>Modulus of Elasticity (MN/m<sup>2</sup>)</i> | <i>Poisson's Ratio (v)</i> |
|--------------------------|---|----------------------------|
| <i>Loose sand</i>        | 10.35 – 24.15                                   | 0.20 – 0.40                |
| <i>Medium dense sand</i> | 17.25 – 27.60                                   | 0.25 – 0.40                |
| <i>Dense sand</i>        | 34.50 – 55.20                                   | 0.30 – 0.45                |
| <i>Silty sand</i>        | 10.35 – 17.25                                   | 0.20 – 0.40                |
| <i>Sand and gravel</i>   | 69.00 – 172.50                                  | 0.15 – 0.35                |
| <i>Soft clay</i>         | 3.1 – 20.7                                      | 0.20 – 0.50                |
| <i>Medium clay</i>       | 20.7 – 41.4                                     |                            |
| <i>Stiff clay</i>        | 41.4 – 96.6                                     |                            |

(Sumber : Das 1999)

**Tabel 2. 7** Korelasi jenis tanah dengan nilai modulus elastisitas

| <i>Type of soil</i>       | <i>Range of values of E (MPa or kN/m<sup>2</sup> x 1000)</i> |
|---------------------------|--|
| 1. <i>Clay</i>            |  |
| (i) <i>Very soft</i>      | 2 – 15   |
| (ii) <i>Soft</i>          | 2- 25  |
| (iii) <i>Medium</i>       | 15 – 20  |
| (iv) <i>Hard</i>          | 50 -100  |
| (v) <i>Sandy</i>          | 25 – 250   |
| 2. <i>Loess</i>           | 15 – 60  |
| 3. <i>Sand</i>            |  |
| (i) <i>Silty</i>          | 5- 20  |
| (ii) <i>Loose</i>         | 10 – 25  |
| (iii) <i>Dense</i>        | 50 -81   |
| 4. <i>Sand and Gravel</i> |  |
| (i) <i>Loose</i>          | 50 – 150   |
| (ii) <i>Dense</i>         | 100 – 200  |
| 5. <i>Silt</i>            | 2 – 20   |

(Sumber : Bowles, 1982)

Selain tabel korelasi berdasarkan jenis tanah yang ditunjukkan pada **Tabel 2.6** dan **Tabel 2.7**, Schmertmann (1970) menyajikan korelasi nilai SPT terhadap modulus elastisitas tanah yang diperoleh melalui persamaan sebagai berikut :

Tanah Pasir

$$E_s \text{ (kN/ m}^2\text{)} = 766 \text{ (N-SPT)} \quad (2.5)$$

$$E_s \text{ (kN/ m}^2\text{)} = 2 q_c \quad (2.6)$$

Tanah Lempung *normally consolidated*

$$E_s \text{ (kN/ m}^2\text{)} = 250 c_u - 500 c_u \quad (2.7)$$

Tanah Lempung *normally consolidated*

$$E_s \text{ (kN/ m}^2\text{)} = 750 c_u - 1000 c_u \quad (2.8)$$

Nilai kohesi ( $c_u$ ) dapat diperoleh melalui korelasi pada **persamaan 2.3**.

### 2.3 Fondasi

Fondasi merupakan bagian dari struktur yang berfungsi untuk meneruskan beban bangunan yang ada di atasnya menuju ke lapisan tanah keras yang dapat mendukung beban tersebut. Fondasi terdiri atas fondasi dangkal dan dalam. Fondasi dangkal biasanya diterapkan untuk mendukung struktur yang tidak terlalu tinggi dan kedalaman tanah keras kurang dari 3 (tiga) meter dengan kondisi tanah yang stabil, sedangkan fondasi dalam biasanya diterapkan pada bangunan tinggi dengan kedalaman fondasi lebih dari 3 (tiga) meter. Pemilihan jenis fondasi dipengaruhi oleh faktor teknis dan non teknis. Faktor teknis diantaranya adalah beban yang akan didukung oleh fondasi dan jenis tanah di sekitar lokasi proyek dimana fondasi akan dibuat. Sedangkan faktor non teknis diantaranya adalah biaya konstruksi dan waktu pelaksanaan konstruksi. Fondasi yang telah dirancang harus memiliki kapasitas yang cukup untuk memikul beban yang ada di atasnya dengan memperhatikan kondisi tanah yang ada di sekitarnya, sehingga tidak terjadi kegagalan pada fondasi berupa penurunan (deformasi).

#### 2.3.1 Fondasi Dangkal

Fondasi dangkal merupakan fondasi yang letaknya tidak terlalu dalam dari permukaan tanah ( $D \leq B$ ). Fondasi dangkal perlu memenuhi beberapa kriteria agar

memiliki kinerja fondasi yang memadai. Kriteria dari fondasi dangkal tersebut adalah fondasi dangkal harus aman terhadap keruntuhan geser yang terjadi pada tanah yang ada di bawahnya dan fondasi dangkal tidak diperkenankan mengalami perpindahan atau penurunan yang berlebihan (relatif karena besarnya perpindahan dan penurunan yang diperbolehkan oleh suatu struktur berbeda-beda tergantung pada beberapa pertimbangan) (sumber : Braja M. Das, 2016). Terdapat beberapa jenis fondasi dangkal yang ada diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Fondasi Menerus

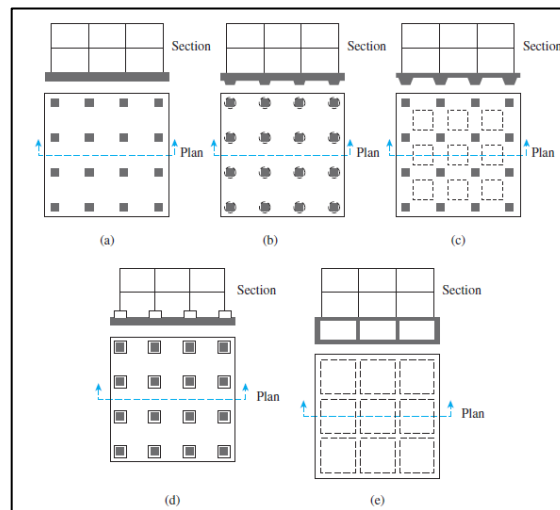
Fondasi ini digunakan untuk bangunan-bangunan sederhana pada tanah asli yang cukup baik. Biasanya kedalamannya antara 60-80 lebar tapak sama dengan tingginya. Kebutuhan bahan baku untuk fondasi ini adalah batu belah (batu kali/gunung), pasir pasang, dan semen PC.

2. Fondasi Telapak

Fondasi yang biasa digunakan untuk bangunan bertingkat atau bangunan diatas tanah lembek adalah fondasi tapak atau fondasi pelat beton bertulang yang dipasang tepat dibawah kolom atau pada tiang sampai pada kedalaman tanah keras (sumber : Abdul, 2015)

3. Fondasi Rakit

Fondasi rakit merupakan fondasi yang menutupi seluruh area dibawah struktur yang mendukung kolom dan dinding. Fondasi rakit biasanya digunakan pada tanah yang memiliki kapasitas daya dukung yang rendah namun diperlukan untuk menahan beban struktur yang besar (sumber : Braja M. Das, 2016). Beberapa tipe fondasi rakit yang biasa digunakan ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



**Gambar 2. 1** Fondasi Rakit

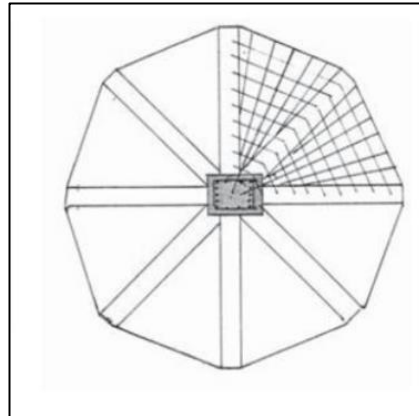
(sumber : Braja M. Das, 2016)

#### 4. Fondasi Sarang Laba-Laba

Fondasi sarang laba-laba merupakan kombinasi konstruksi bangunan bawah yang merupakan perpaduan pelat beton tipis bermutu K-225 berukuran 10- 15 cm yang dibawahnya dikakukan oleh rib-rib tegak yang tipis dan relatif tinggi, biasanya, 50-150 cm dan sistem perbaikan tanah dengan cara pemadatan yang dilakukan diantara rib-rib. Penempatan rib-rib diatur sedemikian rupa sehingga dari atas kelihatan membentuk petak-petak segitiga, sedangkan rongga-rongga di bawah pelat dan diantara rib-rib diisi dengan tanah atau pasir yang dipadatkan lapis demi lapis

Fondasi ini dinamakan sarang laba-laba karena pembesian plat fondasi di daerah kolom selalu berbentuk sarang laba-laba. Juga bentuk jaringannya yang tarik-menarik bersifat monolit yaitu berada dalam satu kesatuan. Rib pada fondasi sarang laba-laba berfungsi sebagai penyebar tegangan atau gaya-gaya yang bekerja pada kolom. Pasir pengisi atau tanah yang dipadatkan diantara rib-rib berfungsi untuk menjepit rib-rib konstruksi terhadap lipatan puntir.

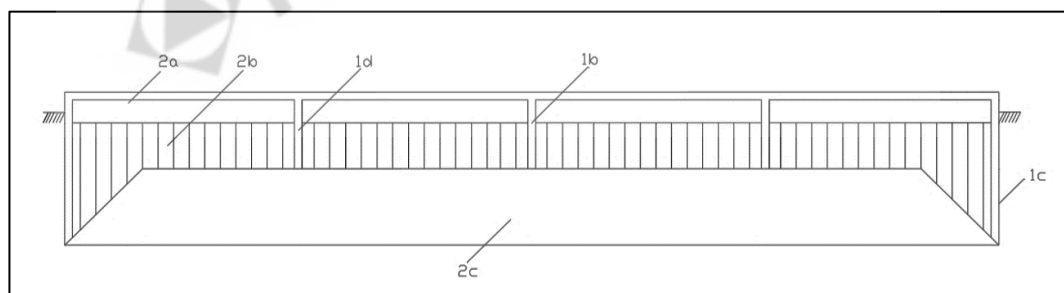




**Gambar 2. 2** Penulangan bagian kolom pada pondasi sarang laba-laba

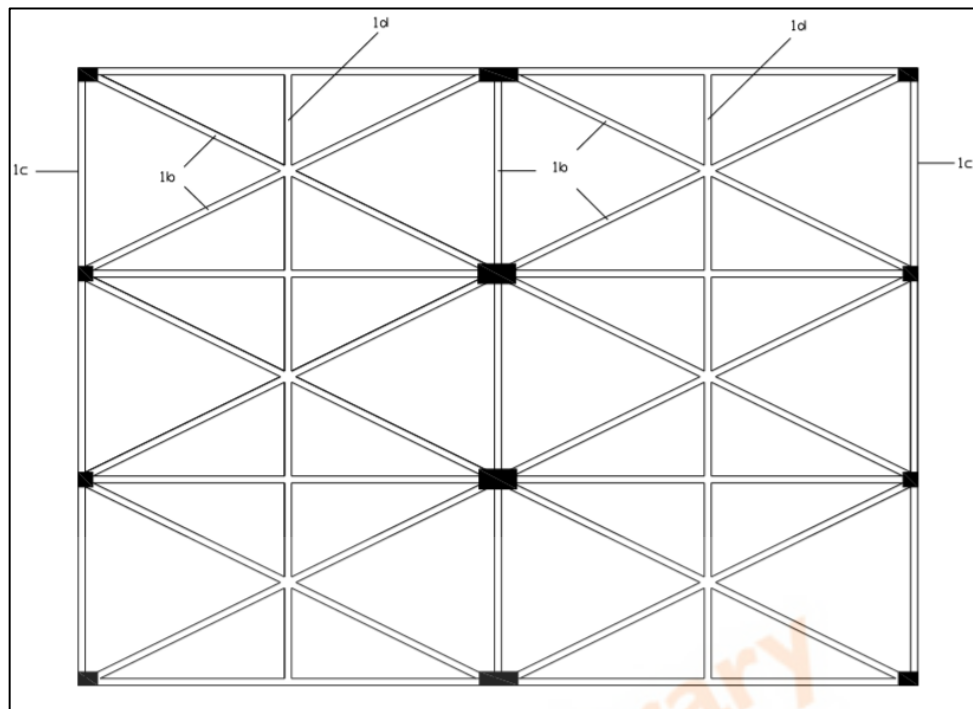
(Sumber : Lidya, 2014)

Fondasi sarang laba-laba terdiri dari 2 bagian konstruksi, yaitu konstruksi beton dan perbaikan tanah. Kontruksi beton berupa kontruksi pelat pipih menerus yang dibawahnya dikakukan oleh rib-rib tegak yang pipih dan tinggi. Ditinjau dari segi fungsinya, rib-rib tersebut ada 3 macam yaitu rib konstruksi, rib *settlement* dan rib pengaku. Bagian dari rib-rib fondasi sarang laba-laba ditunjukkan pada **Gambar 2.3** dan **Gambar 2.4**.



**Gambar 2. 3** Potongan melintang fondasi sarang laba-laba

(Sumber : Ratna Sari, Cipto Haryono, 2007)



**Gambar 2. 4** Tampak atas fondasi sarang laba-laba

(Sumber : Ratna Sari, Cipto Haryono, 2007)

Keterangan :

1a - pelat beton pipih menerus

1b - rib konstruksi

1c - rib settlement

1d - rib pembagi

2a - urugan pasir dipadatkan

2b - urugan tanah dipadatkan

2c - lapisan tanah asli yang ikut terpadatkan

Setelah konstruksi pelat selesai dilakukan perbaikan tanah / pasir untuk pengisi rongga yang ada di antara rib-rib / di bawah pelat. Tanah/ pasir yang dipakai untuk mengisi rongga ini dipadatkan dengan sempurna. Untuk memperoleh hasil yang optimal, maka pemadatan dilaksanakan lapis demi lapis dengan tebal tiap lapis tidak lebih dari 20 cm, sedangkan pada umumnya 2 atau 3 lapis teratas harus melampaui batas 90% atau 95% kepadatan maksimum (*standart proctor*).

Pada dasarnya fondasi KSSL (Konstruksi Sarang Laba- Laba) bertujuan untuk memperkaku sistem fondasi itu sendiri dengan cara berinteraksi dengan tanah pendukungnya. Seperti diketahui bahwa jika fondasi semakin fleksibel, maka distribusi tegangan / stress tanah yang timbul akan semakin tidak merata, terjadi konsentrasi tegangan pada daerah beban terpusat. Dan sebaliknya, jika fondasi semakin kaku / rigid, maka distribusi tegangan / stress tanah akan semakin merata. Hal ini mempengaruhi kekuatan fondasi dalam hal penurunan yang dialami fondasi. Dengan fondasi KSSL, karena mempunyai tingkat kekakuan yang lebih tinggi, maka penurunan yang terjadi akan merata karena masing-masing kolom dijepit dengan rib-rib beton yang saling mengunci (Sumber : Ratna Sari Cipto Haryono, 2007).

Menurut Lokakarya yang diadakan di Bandung pada pertengahan tahun 2004 oleh Puslitbang Depkimpraswil yang dihadiri oleh para pakar gempa dan tanah, disimpulkan kelebihan-kelebihan fondasi KSSL adalah sebagai berikut :

- a) KSSL memiliki kekakuan yang lebih baik dengan penggunaan bahan bangunan yang hemat dibandingkan dengan fondasi rakit (*raft foundation*).
- b) KSSL memiliki kemampuan memperkecil *differential settlement* dan mengurangi *irregular differential settlement* apabila dibandingkan dengan fondasi rakit.
- c) KSSL mampu membuat tanah menjadi bagian dari struktur fondasi karena proses pematatannya akan meniadakan pengaruh lipat atau *lateral buckling* pada rib.
- d) KSSL berpotensi untuk digunakan sebagai fondasi untuk bangunan bertingkat rendah (2 lantai) yang dibangun di atas tanah lunak dengan mempertimbangkan *total settlement* yang mungkin terjadi.
- e) Pelaksanaannya tidak menggunakan alat-alat berat dan tidak mengganggu lingkungan sehingga cocok diterapkan baik di lokasi padat penduduk maupun di daerah terpencil.
- f) KSSL mampu menghemat penggunaan baja tulangan maupun beton.

- g) Waktu pelaksanaan yang diperlukan relatif lebih cepat dan dapat dilaksanakan secara padat karya.
- h) KSSL lebih ekonomis dibandingkan fondasi konvensional rakit atau tiang pancang, lebih-lebih dengan fondasi dalam, sehingga cocok digunakan oleh negara-negara sedang berkembang sebab murah, padat karya dan sederhana

### 2.3.2 Fondasi Dalam

Fungsi utama dari fondasi tiang adalah untuk mentransfer beban ke lapisan tanah yang lebih dalam yang dapat memikul beban kerja dengan faktor keamanan yang cukup agar tidak terjadi keruntuhan dan tanpa menyebabkan penurunan yang dapat mengurangi fungsi struktur yang dipikulnya. Pelaksanaan pekerjaan fondasi tiang harus direncanakan sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu keamanan dan stabilitas bangunan di sekitarnya (sumber : SNI 8740 : 2017). Dengan demikian perancangan fondasi tiang harus memenuhi 3 kondisi berikut ini:

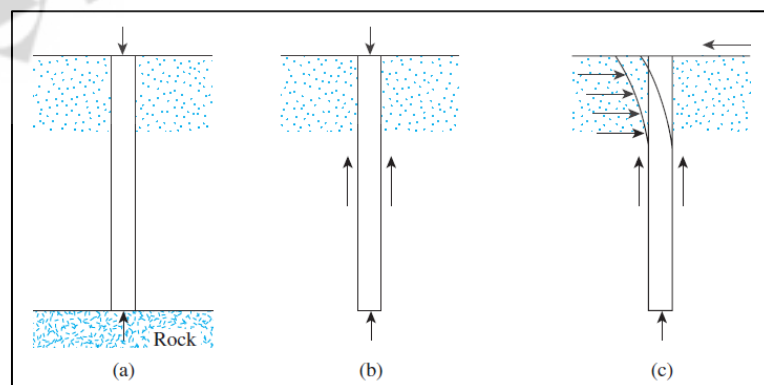
1. Faktor keamanan terhadap keruntuhan, baik untuk tiangnya maupun untuk tanah pendukungnya,
2. Penurunan total dan beda penurunan dari fondasi akibat beban kerja,
3. Keamanan dan stabilitas dari bangunan di sekitarnya.

Tiang merupakan komponen struktur yang terbuat dari baja, beton ataupun kayu. Tiang digunakan untuk membangun fondasi tiang, dimana fondasi tersebut lebih dalam dan memiliki harga yang lebih mahal dibanding fondasi dangkal (Sumber : Braja M. Das, 2016). Berikut merupakan beberapa kondisi dimana diperlukan fondasi dangkal dalam perencanaannya :

1. Apabila lapisan atas tanah memiliki kompresibilitas yang tinggi dan tidak memiliki daya dukung yang cukup untuk mendukung beban bangunan yang ada di atasnya, sehingga digunakan fondasi dalam untuk menyalurkan beban menuju tanah yang lebih keras seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5 (a)** .
2. Apabila lapisan tanah keras berada pada kedalaman yang tidak masuk akal di bawah permukaan tanah, tiang pancang digunakan untuk

menyalurkan beban secara bertahap. Tahanan terhadap beban struktural berasal dari tahanan gesek yang terjadi diantara tanah dan tiang pancang seperti pada gambar **Gambar 2.5 (b)** .

3. Ketika mengalami gaya horizontal. Fondasi tiang tahan terhadap tekuk, dan tetap mampu menahan beban vertikal yang ditransmisikan oleh struktur atas seperti pada gambar **Gambar 2.5 (c)** . Situasi ini biasanya ditemukan pada desain dinding penahan tanah atau fondasi bangunan yang memiliki beban angin dan gempa yang tinggi.
4. Pada beberapa kasus, tanah expansive dan tanah collapsible dapat ditemukan di lapangan. Tanah ini meluas pada kedalaman tertentu di bawah permukaan tanah. Tanah expansive dapat mengembang dan menyusut akibat tingkat kejenuhan tanah berubah-ubah. Jika fondasi dangkal digunakan pada kondisi tanah yang seperti ini, bangunan akan mengalami kerusakan yang cukup parah. Pada kondisi ini, fondasi tiang perlu memiliki panjang yang melebihi kedalaman zona aktif dimana penyusutan dan pengembangan tanah terjadi seperti pada **Gambar 2.6 (a)**.

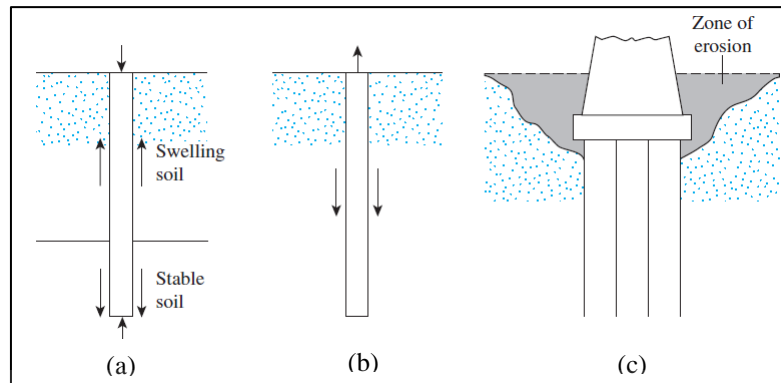


**Gambar 2. 5** Kondisi- kondisi yang memerlukan fondasi dalam

(Sumber : Braja M. Das, 2016)

5. Fondasi untuk beberapa struktur seperti tower transmisi, *offshore*, dan *basement* yang berada di bawah muka air tanah untuk menghindari gaya *uplift* seperti pada **Gambar 2.6 (b)**. Penyangga jembatan dan dermaga juga mengaplikasikan fondasi tiang untuk menghindari kehilangan

daya dukung tanah yang akan dialami fondasi dangkal akibat adanya erosi pada permukaan tanah seperti pada **Gambar 2.6 (c)**.



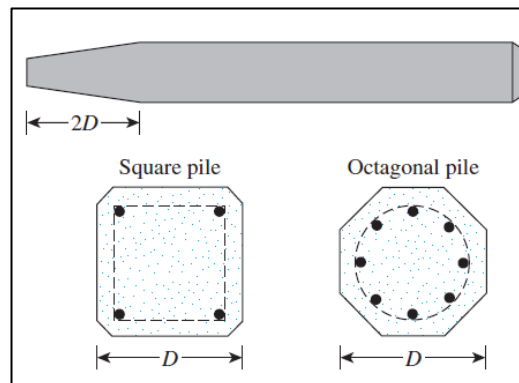
**Gambar 2.6** Kondisi- kondisi yang memerlukan fondasi dalam (lanjutan)

(Sumber : Braja M. Das, 2016)

Terdapat beberapa tipe fondasi dalam yang digunakan pada proyek konstruksi. Pemilihan tipe fondasi ini didasarkan pada beban yang akan didukung, kondisi tanah, dan kedalaman muka air tanah. Berdasarkan bahan pembentuknya, fondasi dalam dapat dikategorikan menjadi tiang baja, tiang beton, tiang kayu, dan tiang komposit (Sumber : Braja M. Das, 2016) Fondasi dalam yang umumnya sering digunakan adalah fondasi tiang beton. Fondasi tiang beton terdiri dari 2 (dua) jenis, yaitu fondasi tiang *precast* atau biasa disebut tiang pancang, dan fondasi tiang *cast-in-situ* atau biasa disebut fondasi tiang bor.

#### 1. Fondasi Tiang Pancang (*precast piles*)

Fondasi *precast* dibuat dengan menggunakan tulangan biasa. Fondasi ini dapat berbentuk kotak atau segi-delapan (**Gambar 2.7**). Perkuatan dengan menggunakan tulangan digunakan agar fondasi tiang mampu menahan momen lentur. Fondasi tiang pancang memiliki keuntungan tahan korosi, dapat diberikan beban yang besar, dan dapat dengan mudah dikombinasikan dengan struktur di atasnya. Sedangkan kekurangan dari fondasi ini adalah sulit untuk pengangkutannya.

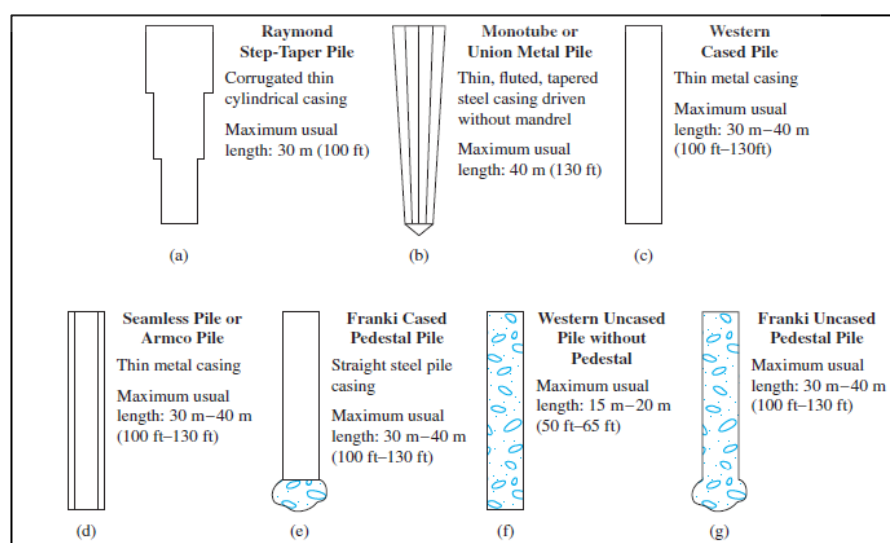


**Gambar 2. 7** Fondasi tiang pancang

(Sumber : Braja M. Das, 2016)

## 2. .Fondasi Tiang Bor

Fondasi tiang bor dibuat dengan melakukan pengeboran pada permukaan lalu mengisi lubang hasil pengeboran tersebut dengan beton. Terdapat 2 (dua) kategori fondasi tiang bor , yaitu fondasi tiang bor dengan case dan fondasi tiang bor tanpa case (Sumber : Braja M. Das, 2016). Fondasi tiang bor dengan case dibuat dengan cara memasukkan case baja ke dalam permukaan tanah lalu mengisinya dengan beton. **Gambar 2.8 (a) (b) (c) (d) (e)** menunjukkan fondasi tiang bor dengan menggunakan case dan **Gambar 2.9 (f) (g)** menunjukkan fondasi tiang bor tanpa case.



**Gambar 2. 8** Fondasi tiang bor

(Sumber : Braja M. Das, 2016)

Keuntungan dari pemakaian fondasi tiang bor yaitu, relatif murah, dapat dilakukan pengecekan sebelum pengecoran beton, dan mudah untuk diperpanjang. Sedangkan kekurangan dari penggunaan fondasi tiang bor yaitu, sulit untuk disambung dan casing yang tipis berpotensi rusak saat pemasangan.

#### 2.4 Daya Dukung Fondasi Tiang

Beban ultimit ( $Q_u$ ) yang mampu didukung oleh fondasi tiang merupakan penjumlahan dari kapasitas tahanan ujung fondasi ( $Q_p$ ) dan kapasitas tahanan selimut fondasi ( $Q_s$ ) atau dapat dituliskan dengan menggunakan **persamaan 2.9** di bawah ini .

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.9)$$

Tahanan ujung pada suatu fondasi tiang dapat dikalkulasikan menggunakan **persamaan 2.10** seperti berikut :

$$Q_p = A_p \times q_p = A_p (c'N^*c + q'N^*q) \quad (2.10)$$

Keterangan :

- $A_p$  = luas permukaan ujung tiang
- $c'$  = nilai kohesi pada tanah yang mendukung ujung tiang
- $q_p$  = unit tahanan ujung
- $q'$  = tekanan vertikal efektif pada kedalaman ujung tiang
- $N^*c, N^*q$  = faktor tahanan (ditujukan pada **gambar 2.9**)

Beban ultimit pada tahanan ujung fondasi tiang dapat dihitung melalui **persamaan 2.11** berikut :

$$q_t = 0,5 p_a N * q \tan \phi' \quad (2.11)$$

Keterangan :

- $p_a$  = tekanan atmosfer ( $100 \text{ kN/m}^2$ )
- $\Phi$  = sudut geser tanah efektif pada ujung tiang

Sedangkan tahanan selimut pada fondasi tiang dapat dikalkulasikan melalui **persamaan 2.12** sebagai berikut:



$$Q_s = \Sigma p\Delta Lf \quad (2.12)$$

Keterangan :

P = keliling dari fondasi tiang

$\Delta L$  = perbedaan panjang tiang

f = unit tahanan gesek pada setiap kedalaman z

**Table 9.5** Interpolated Values of  $N_q^*$  Based on Meyerhof's Theory

| Soil friction angle, $\phi$ (deg) | $N_q^*$ |
|-----------------------------------|---------|
| 20                                | 12.4    |
| 21                                | 13.8    |
| 22                                | 15.5    |
| 23                                | 17.9    |
| 24                                | 21.4    |
| 25                                | 26.0    |
| 26                                | 29.5    |
| 27                                | 34.0    |
| 28                                | 39.7    |
| 29                                | 46.5    |
| 30                                | 56.7    |
| 31                                | 68.2    |
| 32                                | 81.0    |
| 33                                | 96.0    |
| 34                                | 115.0   |
| 35                                | 143.0   |
| 36                                | 168.0   |
| 37                                | 194.0   |
| 38                                | 231.0   |
| 39                                | 276.0   |
| 40                                | 346.0   |
| 41                                | 420.0   |
| 42                                | 525.0   |
| 43                                | 650.0   |
| 44                                | 780.0   |
| 45                                | 930.0   |

**Gambar 2. 9** Faktor  $N_q^*$

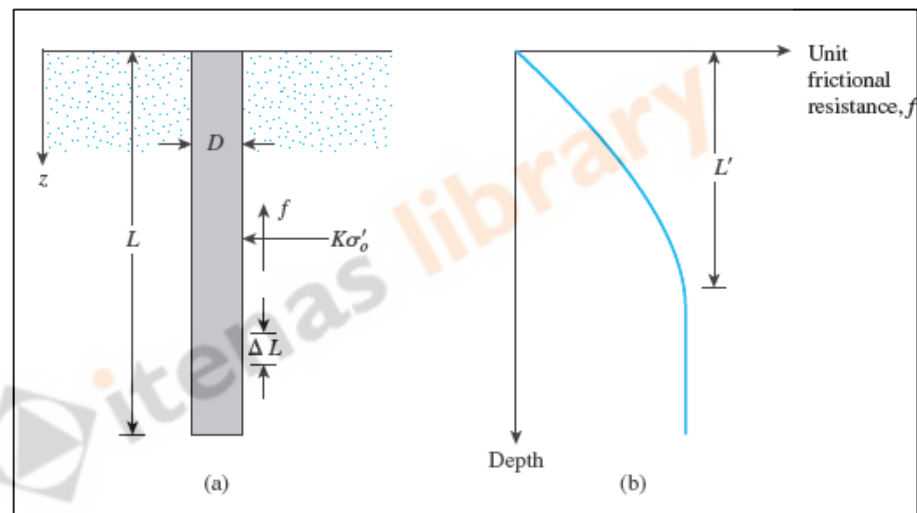
(Sumber : Braja M Das, 2016)

Tahanan gesek (f) pada fondasi tiang sulit diperkirakan. Estimasi tahanan gesek perlu memperhatikan beberapa faktor penting sebagai berikut:

1. Sifat pemasangan tiang. Untuk tiang pancang pada tanah pasir, getaran yang disebabkan selama pemasangan tiang dapat membantu memadatkan tanah yang ada di sekitar tiang pancang. Zona yang

terpadatkan kira-kira 2,5 kali diameter tiang pada pasir yang ada di sekelilingnya.

2. Observasi mengatakan sifat variasi nilai  $f$  dilapangan dapat ditunjukkan pada **gambar 2.10** dimana unit tahanan gesek selimut tiang meningkat berbanding lurus dengan kedalaman dan linier pada kedalaman kurang lebih pada kedalaman  $L' = 15D$ .
3. Pada kedalaman yang sama, tahanan gesek selimut pada pasir akan lebih tinggi pada tiang pancang dibandingkan dengan tiang dengan pemasangan yang tidak dipancang.



**Gambar 2. 10** Tahanan gesek selimut pada fondasi tiang di tanah pasir

(sumber : Braja M Das, 2016)

Melalui faktor-faktor tersebut, unit tahanan gesek pada fondasi tiang di tanah pasir dapat dihitung melalui **persamaan 2.13** untuk kedalaman  $z = 0$  sampai  $z = L'$ .

$$f = K \times \sigma'_o \times \tan \delta' \quad (2.13)$$

Keterangan :

- $K$  = tekanan efektif koefisien (**Gambar 2.11**)
- $\sigma'_o$  = tegangan vertikal efektif pada kedalaman yang diperhitungkan
- $\delta'$  = sudut geser tanah (bervariasi dari  $0,5\Phi$  sampai  $0,8\Phi$ )

| Pile type                | $K$  |
|--------------------------|--|
| Bored or jetted          | $\approx K_o = 1 - \sin \phi'$                                   |
| Low-displacement driven  | $\approx K_o = 1 - \sin \phi'$ to $1.4K_o = 1.4(1 - \sin \phi')$ |
| High-displacement driven | $\approx K_o = 1 - \sin \phi'$ to $1.8K_o = 1.8(1 - \sin \phi')$ |

**Gambar 2. 11** Nilai koefisien K berdasarkan tipe fondasi tiang

(sumber : Braja M Das, 2016)

Sedangkan unit tahanan gesek pada fondasi tiang di tanah lempung dapat dikalkulasikan dengan menggunakan metode  $\alpha$  sebagai berikut:

$$f = \alpha \times c_u \quad (2.14)$$

Keterangan :

$\alpha$  = faktor adhesi empiris (**Gambar 2.12**)

$c_u$  = kohesi *undrained*

| $\frac{c_u}{p_a}$ | $\alpha$ |
|-------------------|----------|
| $\leq 0.1$        | 1.00     |
| 0.2               | 0.92     |
| 0.3               | 0.82     |
| 0.4               | 0.74     |
| 0.6               | 0.62     |
| 0.8               | 0.54     |
| 1.0               | 0.48     |
| 1.2               | 0.42     |
| 1.4               | 0.40     |
| 1.6               | 0.38     |
| 1.8               | 0.36     |
| 2.0               | 0.35     |
| 2.4               | 0.34     |
| 2.8               | 0.34     |

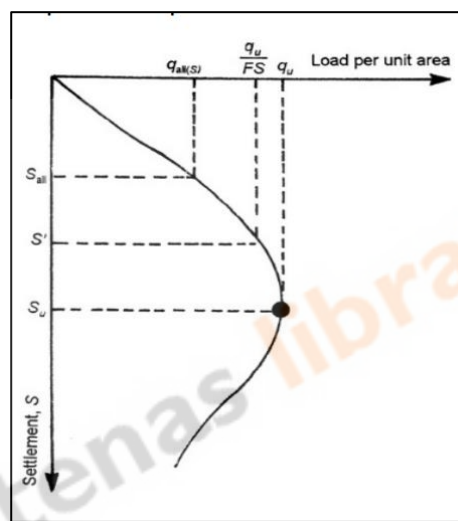
**Gambar 2. 12** nilai  $\alpha$

(sumber : Braja M Das, 2016)

## 2.5 Deformasi

Apabila tanah dibebani maka tanah dibawahnya akan mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan adanya deformasi partikel tanah, keluarnya air dari dalam pori, dan sebab-sebab lainnya. Walaupun telah digunakan faktor keamanan yang cukup terhadap kemungkinan terjadinya keruntuhan geser,

namun hal ini tidak otomatis menjamin bahwa penurunan fondasi akan menjadi kecil atau memenuhi syarat deformasi yang ditentukan. (lihat **Gambar 2.13**). Pada **Gambar 2.13** terlihat bahwa berdasarkan keruntuhan geser maka daya dukung izin fondasi adalah sebesar  $q_u/SF$ . Namun mengingat besarnya penurunan yang terjadi  $S'$  lebih besar dari penurunan yang diizinkan,  $S_{all}$ , maka untuk kondisi ini daya dukung izin fondasi yang betul adalah sebesar  $q_{all}(s)$ . Dengan kata lain daya dukung izin ditentukan berdasarkan kriteria penurunan yang diizinkan.



**Gambar 2. 13** Kurva penurunan-pembebanan untuk fondasi dangkal

(Sumber : SNI 8740 :2017)

Penurunan total terdiri atas penurunan langsung (seketika) dan penurunan konsolidasi. Penurunan segera (*immediated settlement*) akan terjadi saat beban diberikan dan penurunan jangka panjang/konsolidasi (*long-term settlement*) mulai terjadi beberapa saat setelah pemberian beban. Penurunan terjadi antara lain akibat:

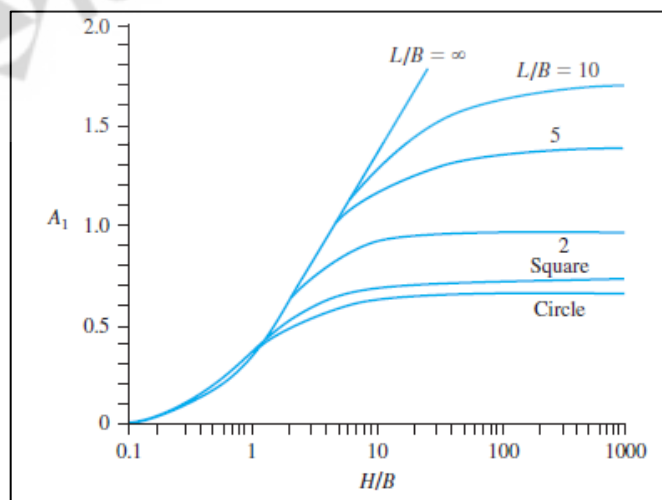
1. Pemberian beban pada fondasi;
2. Berubahnya elevasi muka air tanah;
3. Getaran akibat beban mesin, kereta api, termasuk akibat gempa; dan
4. Perubahan tegangan yang bekerja pada lapisan tanah fondasi sebagai akibat antara lain adanya galian atau pekerjaan konstruksi di sekitarnya.

Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, atau jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori tanah. Janbu (1956) merumuskan persamaan untuk menghitung penurunan segera (*immediate settlement*) pada fondasi dangkal diatas tanah lempung jenuh dengan yang dapat dihitung dengan menggunakan **persamaan 2.15**.

$$S_i = A_1 \cdot A_2 \cdot \frac{q_0 \times B}{E_s} \quad (2.15)$$

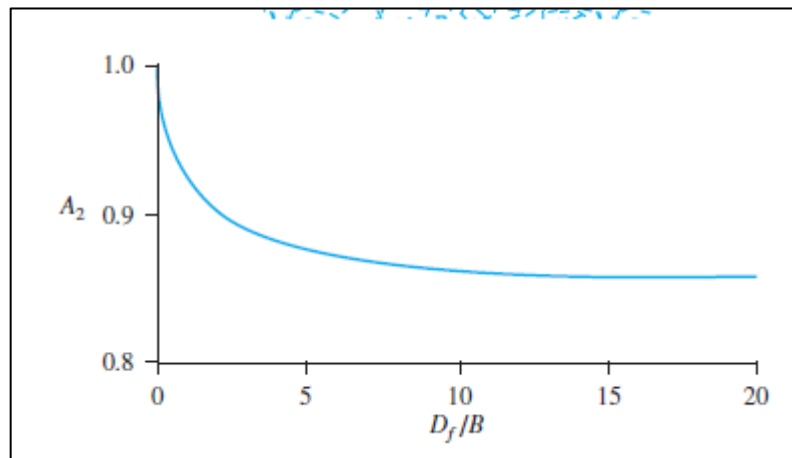
Keterangan :

- A1 = f (H/B, L/B) (ditunjukkan pada **Gambar 2.14**)
- A2 = f (Df / B) (ditunjukkan pada **Gambar 2.15**)
- L = Panjang fondasi
- B = Lebar fondasi
- Df = Kedalaman fondasi
- H = kedalaman bagian bawah fondasi ke lapisan kaku
- q<sub>0</sub> = beban per unit area dari fondasi



**Gambar 2. 14** Nilai koefisien A<sub>1</sub>

(Sumber : Braja M. Das, 2016)



**Gambar 2.15** Nilai koefisien  $A_2$

(Sumber : Braja M. Das, 2016)

Konsolidasi tanah adalah peristiwa penurunan tanah akibat terdisipasinya air pori yang berlangsung pada waktu yang lama. Tanah merupakan suatu material multifase yang terdiri dari partikel tanah padat, air, serta udara. Pemberian beban pada tanah, akan menyebabkan meningkatnya tegangan yang bekerja pada tanah tersebut. Hal ini akan menyebabkan terdisipasi air pori tanah melalui pori-pori tanah, yang mengakibatkan berkurangnya volume tanah sehingga menyebabkan terjadinya penurunan konsolidasi. Penurunan konsolidasi dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut.

Untuk *normally consolidated clays*

$$S_c = \frac{C_c \times H_c}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{av}}{\sigma'_o} \quad (2.16)$$

Untuk *overconsolidated clays* dengan  $\sigma'_o + \Delta\sigma'_{av} < \sigma'_c$

$$S_c = \frac{C_s \times H_c}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{av}}{\sigma'_o} \quad (2.17)$$

Untuk *overconsolidated clays* dengan  $\sigma'_o < \sigma'_c < \sigma'_o + \Delta\sigma'_{av}$

$$S_c = \frac{C_s \times H_c}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c \times H_c}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{av}}{\sigma'_o} \quad (2.18)$$

Keterangan :

- $\sigma'_o$  = tegangan efektif pada lapisan lempung sebelum konstruksi fondasi  
 $\Delta\sigma'_{av}$  = rata-rata peningkatan tegangan efektif pada lapisan lempung yang disebabkan oleh konstuksi dari fondasi  
 $\sigma'_c$  = tegangan prakonsolidasi  
 $e_o$  = rasio pori pada lapisan lempung  
 $C_c$  = *compression index*  
 $C_s$  = *swelling index*  
 $H_c$  = Ketebalan lapisan lempung

Pada fondasi tiang total penurunan pada saat beban vertikal  $Q_w$  bekerja dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \quad (2.19)$$

Keterangan :

$S_{e(1)}$  = penurunan elastis dari fondasi tiang

$S_{e(2)}$  = penurunan pada fondasi tiang akibat beban pada ujung pondasi

$S_{e(3)}$  = penurunan pada fondasi tiang akibat beban yang ditransmisikan sepanjang fondasi tiang

Jika material dari fondasi tiang diasumsikan sebagai material elastis, deformasi pada tiang dapat dikalkulasikan sebagai berikut :

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L}{A_p E_p} \quad (2.20)$$

Keterangan :

$Q_{wp}$  = beban yang didukung oleh ujungpondasi tiang pada saat kondisi beban bekerja

$Q_{ws}$  = beban yang didukung oleh selimut pondasi tiang pada saat kondisi beban bekerja

$A_p$  = Luas *cross section* fondasi tiang

$L$  = panjang dari fondasi tiang

$E_p$  = modulus elastisitas dari material fondasi tiang

$\xi$  = bervariasi diantara 0,5 – 0,67 tergantung dari penyebaran dari tahanan

geser selimut fondasi tiang.

Penurunan pada tiang bor yang diakibatkan oleh beban yang didukung oleh ujung tiang dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut :

$$s_{e(2)} = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (2.21)$$

Keterangan :

- D = lebar diameter fondasi tiang
- $q_{wp}$  = beban terpusat per unit luas pada ujung tiang =  $Q_{qp}/A_p$
- $E_s$  = modulus elastisitas tanah di bawah ujung fondasi tiang
- $\mu_s$  = *poisson's ratio* pada tanah

Penurunan tiang akibat beban yang didukung sepanjang selimut pada fondasi tiang dapat dikalkulasikan dengan persamaan berikut :

$$s_{e(3)} = \left(\frac{Q_{wp}}{pL}\right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (2.22)$$

Keterangan :

- p = keliling fondasi tiang
- L = panjang tiang tertanam
- $I_{ws}$  = faktor yang dihitung dengan **persamaan 2.23**

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad (2.23)$$

Sedangkan perbedaan penurunan pada fondasi rakit dapat dikalkulasikan dengan mengkalkulasikan faktor kekakuan dengan persamaan sebagai berikut (American Concrete Institute Committee 336,1988) :

$$K_r = \frac{E' I_b}{E_s B^3} \quad (2.24)$$

Keterangan :

- $E'$  = Modulus elastisitas dari material yang dipakai pada struktur
- $E_s$  = Modulus elastisitas dari tanah
- B = Lebar fondasi
- $I_b$  = Momen inersia dari struktur perunit panjang



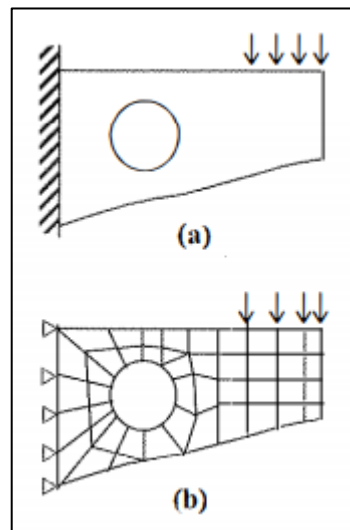
Berdasarkan nilai kekakuan  $K_r$ , rasio ( $\delta$ ) perbandingan perbedaan penurunan terhadap penurunan total dapat ditentukan dengan ketentuan sebagai berikut :

1. Jika  $K_r > 0.5$  , dapat dikatakan fondasi rakit tersebut rigid dan  $\delta = 0$
2. Jika  $K_r = 0.5$  , maka  $\delta = 1$
3. Jika  $K_r = 0$  , maka  $\delta = 0,35$  untuk fondasi rakit persegi ( $B/L = 1$ ) dan maka  $\delta = 0,5$  untuk fondasi yang panjang ( $B/L = 0$ )

Besarnya penurunan total dan beda penurunan yang diizinkan ditentukan berdasarkan toleransi struktur atas dan bangunan sekitar yang harus ditinjau berdasarkan masing-masing kasus tersendiri dengan mengacu pada integritas, stabilitas dan fungsi dari struktur di atasnya. Penurunan izin  $< 15 \text{ cm} + b/600$  (b dalam satuan cm) untuk bangunan tinggi dan bisa dibuktikan struktur atas masih aman. Beda penurunan (*differential settlement*) yang diperkirakan akan terjadi harus ditentukan secara saksama dan konservatif, serta pengaruhnya terhadap bangunan gedung tinggi di atasnya harus dicek untuk menjamin bahwa beda penurunan tersebut masih memenuhi kriteria kekuatan dan kemampuan sebesar 1/300.

## 2.6 Metode Elemen Hingga

Teknik solusi numerik pada metode elemen hingga dapat diterapkan pada masalah fisika yang luas, berhubungan dengan variabel aljabar, differensial, atau persamaan integrasi . Pada metode elemen hingga permasalahan ini diatasi dengan membagi sebuah kontinum menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen, sehingga solusi dalam tiap bagian kecil dapat dinyatakan dalam fungsi yang jauh lebih sederhana daripada fungsi untuk keseluruhannya. Bagian-bagian kecil tadi secara matematis dihubungkan satu sama lain dengan kondisi sedemikian sehingga kompatibel dan kontinu antar bagian kecil atau elemen, disamping itu syarat batasnya juga terpenuhi. **Gambar 2.16** memperlihatkan pembagian sebuah kontinum. Bentuk dan ukuran elemen tidak harus sama tetapi harus kontinu dan kompatibel. (Winarni, 2005)



**Gambar 2. 16** Diskretisasi sebuah kontinum (a) kontinum (b) deskretisasi menjadi elemen  
(Sumber :Hadi Pratomo, 2005)

Tiga bidang utama yang dapat dipecahkan dengan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

1. Masalah keseimbangan  
Meliputi masalah yang tidak tergantung waktu, misalnya analisis tegangan dari sistem linier elastis, elektrostatik, magnetostatik, konduksi termal, dan aliran fluidal.
2. Masalah *Eigenvalue*  
Merupakan lanjutan dari masalah keseimbangan. Nilai spesifik atau nilai kritis tertentu harus ditentukan, misalnya stabilitas struktur dan penentuan frekuensi alamiah suatu sistem linier elastis dan masalah vibrasi.
3. Masalah penyebaran (*propagation problems*)  
Meliputi masalah yang bergantung kepada waktu, misalnya hidrodinamika, dan analisis dinamis.

## 2.7 Teori Keruntuhan Mohr Coulomb

Mohr (1900) memperkenalkan sebuah teori tentang keruntuhan yang dikenal dengan teori keruntuhan Mohr Coulomb, yang menyatakan bahwa

keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser, bukan hanya akibat tegangan normal dan geser dalam kondisi maksimum saja. Persamaan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb yang dapat ditulis menjadi persamaan berikut ini :

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.25)$$

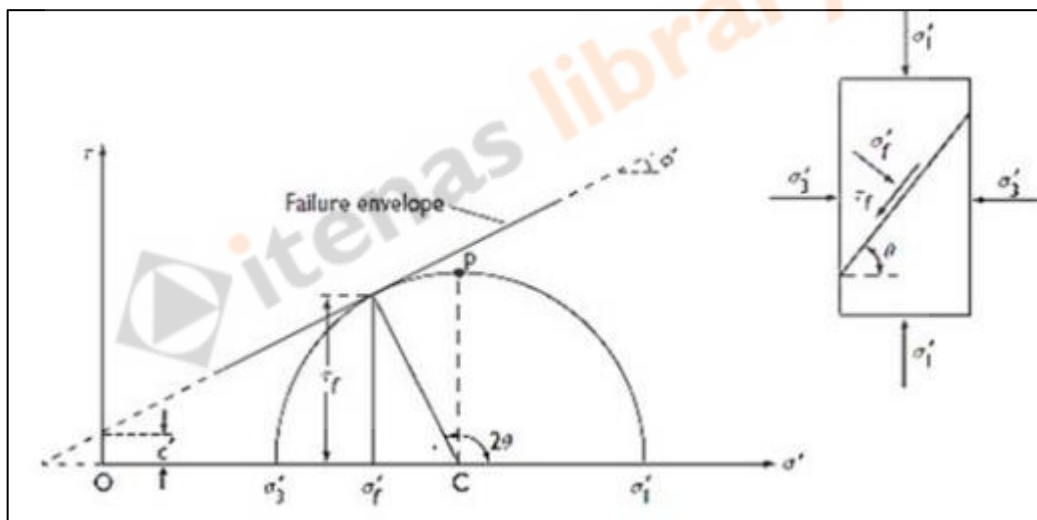
Dimana :  $\tau_f$  = tegangan geser

$c$  = kohesi

$\sigma$  = tegangan normal

$\phi$  = sudut geser dalam

Keruntuhan geser tidak akan terjadi jika tegangan normal dan geser bekerja pada suatu bidang massa tanah, sedangkan keruntuhan geser akan terjadi jika tegangan normal dan geser tepat pada garis keruntuhan.



**Gambar 2. 17** Keruntuhan Mohr Coulomb

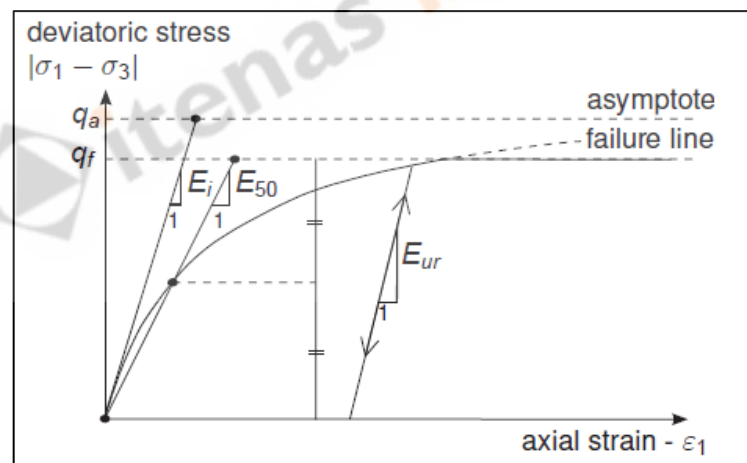
(Sumber : Indra, Desti, 2017)

## 2.8 Teori *Hardening Soil*

Model *Hardening soil* didirikan pada tahun 1999 oleh (Schanz et al., 1999) dalam rangka teori elastisitas. Dalam model ini, strain (elastis dan plastik) dihitung berdasarkan kekerasan dari tegangan permukaan dan kekerasan ini berbeda untuk pemuatan awal dan pembongkaran / pemuatan (Obrzud, 2010). Ketika mengalami pembebanan deviatorik primer, tanah menunjukkan kekakuan yang menurun dan

strain plastik yang ireversibel secara bersamaan berkembang. Dalam kasus khusus uji triaksial yang dikeringkan, hubungan yang diamati antara regangan aksial dan tegangan deviatorik dapat diperkirakan dengan baik oleh hiperbola. Hubungan semacam itu pertama kali dirumuskan oleh Kondner (1963) dan kemudian digunakan dalam model hiperbolik terkenal (Duncan & Chang, 1970). Beberapa karakteristik dasar model adalah: (Sumber : Plaxis, 2018)

1. Kekakuan tergantung tegangan menurut parameter ( $m$ ). Kekakuan  $m$  umumnya 0.5 untuk pasir, dan 1.0 untuk lempung dan lanau.
2. Regangan plastis saat pembebanan deviator primer ( $E_{50}^{ref}$ )
3. Regangan plastis saat tekanan primer ( $E_{oed}^{ref}$ ). Dapat diambil  $E_{oed}^{ref} = 0,8 E_{50}^{ref}$  (Plaxis, 2018) atau dalam hal kurangnya data uji oedometrik, modulus oedometrik kira-kira dapat diambil sebagai  $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ .
4. Regangan elastis *unloading/reloading* ( $E_{ur}^{ref}, v_{ur}$ ).
5. Kegagalan sesuai parameter kriteria Mohr Coulomb ( $c, \Psi, \phi$ )



**Gambar 2. 18** hubungan hiperbolik tegangan regangan primer untuk uji triaksial *drained standard* (Sumber : Plaxis, 2018)

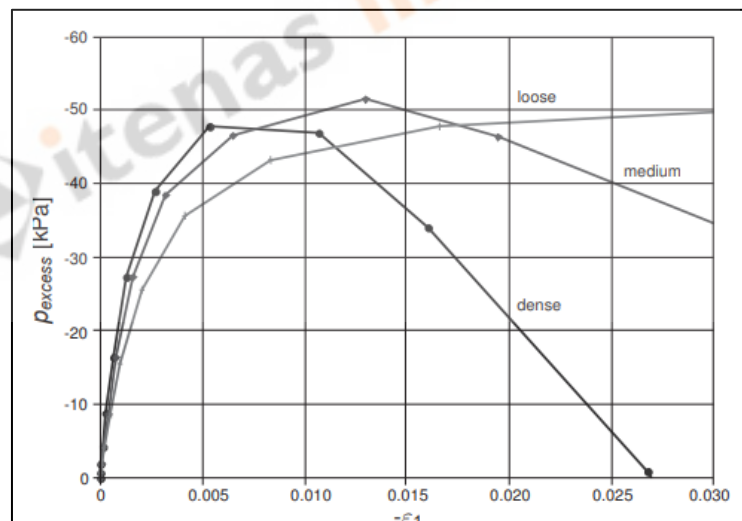
Secara umum, hubungan antara modulus kekakuan adalah  $E_{50} < E_s < E_{ur}$ . Dalam kasus ketika  $E_{50}$  atau  $E_{ur}$  tidak dapat ditentukan secara langsung dari kurva eksperimental, nilai tersebut dapat dikalkulasikan dengan :

$$\frac{E_{ur}^{ref}}{E_{50}^{ref}} = 2 \text{ to } 6 \quad (2.26)$$

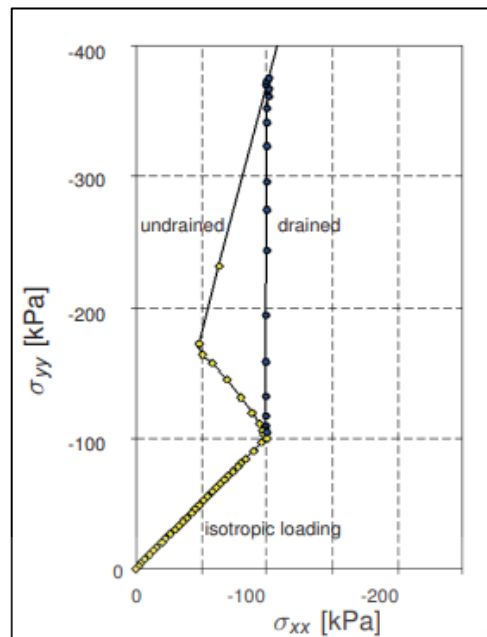
Pemodelan tanah *hardening soil* memperhatikan pemadatan plastis yang menyebabkan tegangan vertikal meningkat seiring dengan perkembangan tegangan pori berlebih. Hal ini dapat dilihat melalui test *undrained* dengan triaxial. Pada tes *undrained* tingkat kegagalan pada tanah lebih rendah dibandingkan test *drained*.

**Gambar 2.19** menunjukkan pada tes *undrained*, tingkat kegagalan pada tanah pada prinsipnya lebih rendah daripada tes *drained*. Namun pada tanah medium dan pasir padat tingkat tegangan tanah kembali meningkat setelah menyentuh titik kegagalan yang disebabkan oleh adanya sudut dilatasi yang menyebabkan pengurangan tegangan air pori dan meningkatkan tegangan efektif.

**Gambar 2.20** menunjukkan diagram tegangan efektif pada pasir medium dengan menggunakan *drained* dan *undrained* tes. Pada saat tes *undrained* tegangan efektif horizontal menurun seiring dengan peningkatan tegangan vertical yang disebabkan oleh peningkatan tegangan air pori.



**Gambar 2. 19** Hasil undrained triaxial test menggunakan hardening soil, kelebihan tegangan air pori vs regangan axial  
(sumber : PLAXIS 2018)



**Gambar 2. 20** Diagram tegangan untuk *drained* dan *undrained* tes triaxial dengan menggunakan *hardening soil model*  
(Sumber : PLAXIS 2018)

itenas library