

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Konstruksi perkerasan jalan yang dibangun di atas tanah lempung ekspansif sering tidak mencapai umur rencananya. Hal-hal yang dapat mengurangi kinerja perkerasan yaitu kerusakan struktur, pengaruh lingkungan dan deformasi karena kembang-susut tanah ekspansif. Kerusakan yang terjadi dapat berupa kenaikan struktur, retak dan bergelombang. Oleh karena itu sistem perkerasan jalan harus dirancang tahan lama dengan memperhatikan salah satu aspek berupa aspek geoteknik.

Menurut Hardiyatmo (2017), perancangan pada aspek geoteknik berfokus pada drainase, pemilihan material agregat, lapis pondasi bawah yang tidak sensitif terhadap kelembaban air serta kondisi tanah dasar yang stabil meski terjadi perubahan kadar air.

Tanah lempung ekspansif memiliki karakteristik potensi kembang-susut yang tinggi karena perubahan kadar air. Umumnya perubahan kadar air tanah di lapangan akibat terjadinya pengaruh lingkungan seperti musim hujan dan kemarau. Pada musim hujan, air mengisi tanah sehingga membuat tanah menjadi jenuh air dan menyebabkan tanah mengembang. Sebaliknya pada musim kemarau kadar air berkurang dan menyebabkan tanah lempung ekspansif menyusut.

Hardiyatmo (2017) menyatakan bahwa pengembangan tanah memiliki proses yang lebih kompleks daripada penyusutan tanah. Besar perubahan volume dan tekanan pengembangan tergantung oleh faktor, seperti: Jumlah mineral lempung, kadar air awal, kepadatan dan tekanan yang bekerja di atasnya. Besarnya tanah akan mengembang tergantung pada persentase jumlah lempung *montmorillonite* yang terkandung dalam tanah. Namun jenis mineral pada tanah bervariasi sehingga tidak semua daerah tanah memiliki mineral *montmorillonite* yang dominan. Sehingga kenaikan dan penurunan tanah yang terjadi menyebabkan deformasi pada struktur tidak seragam.

Menurut Suhendro (2006), deformasi struktur dapat di tangani dengan melakukan perbaikan / penggantian tanah pada lapis *subgrade* atau membuat

perkerasan yang bersifat kaku. Pertimbangan menggunakan konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*) karena struktur tersebut dapat menahan perbedaan kenaikan akibat pengembangan yang tidak seragam. Metode perkerasan kaku yang digunakan adalah metode khusus yaitu Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM). Penggunaan metoda cakar ayam modifikasi ini dapat menciptakan pelat yang lebih kaku dan tahan terhadap penurunan tidak seragam karena pelat didukung oleh cakar yang tertanam di dalam tanah (Hardiyatmo, 2017).

Pengembangan metoda lainnya dari Sistem Cakar Ayam adalah Sistem Pelat Terpaku (*Nailed Slab System*), kedua sistem memiliki kesamaan yaitu pelat dan tiang dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan sehingga terbentuk suatu interaksi antara tanah dan struktur yang tahan terhadap deformasi tanah dasar. Perbedaan dari Sistem Cakar Ayam adalah sistem ini menggunakan pelat tipis yang didukung oleh pipa-pipa (cakar) yang tertanam di dalam tanah, posisi pipa menggantung pada bagian bawah pelat (Hardiyatmo, 2017).

Beberapa pendekatan untuk memvalidasi interaksi antara tanah dan struktur dilakukan dengan menggunakan metode seperti metode *Beam on Elastic Foundations (BoEF)* dan metode elemen hingga. Metode analisis perancangan struktur perkerasan kaku (*rigid pavement*) telah diusulkan oleh Suhendro (2006) dengan menggunakan analisis elemen hingga 3-D kondisi tertentu. Analisis ini mensimulasikan variasi jarak/diameter/panjang pipa-pipa dan nilai CBR sebagai kondisi tanah-dasar. Selanjutnya hasil analisis ini disajikan dalam bentuk "*Suhendro Charts*". Kondisi tanah dasar menggunakan variasi nilai modulus reaksi *subgrade* horizontal ( $k_h$ ) beberapa kali dari nilai modulus reaksi *subgrade* vertikal ( $k_v$ ).

Menurut Hardiyatmo (2017), metode *Beam on Elastic Foundations (BoEF)* dan metode elemen hingga digunakan dalam perancangan struktur Sistem Cakar Ayam (CAM) dan Sistem Pelat Terpaku. Hasil dari analisis metode tersebut berupa nilai-nilai lendutan, momen dan gaya lintang. Sistem pelat dengan kelompok tiang menaikkan daya dukung dan menjaga kontak yang baik dengan tanah dasar dengan mengasumsikan tiang akan menambah nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k'$ ).

Penelitian – penelitian terdahulu tentang metode perkerasan kaku telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya yaitu Sistem Cakar Ayam Modifikasi ditemukan oleh Sedyatmo (1961) dan Sistem Pelat Terpaku oleh Hardiyatmo (2008) terbukti dapat mengatasi deformasi tidak seragam pada tanah-dasar serta mengakibatkan interaksi struktur dengan susunan kelompok tiang dan *subgrade* lebih kaku.

Mohammedzein (1999), melakukan analisis numeris metode elemen hingga pada tanah ekspansif dengan perkuatan tiang. Penelitian ini menunjukkan penambahan panjang tiang dengan diameter yang tetap akan mengurangi kenaikan vertikal dari tiang. Pemodelan yang diusulkan memberikan nilai kenaikan yang paling mendekati keadaan dilapangan.

Nasibu (2009), meneliti tentang pengaruh panjang tiang terhadap nilai modulus reaksi *subgrade* pada tanah lempung lunak menggunakan kontribusi nilai  $k_v$  dalam sistem perkuatan tiang.

Xiao (2011), mensimulasi pendekatan numeris terhadap interaksi pondasi tiang dan tanah ekspansif. Pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan diameter kecil  $d \approx 0,04L$  dan pemanjangan panjang tiang dapat memberikan hasil yang efektif dalam mereduksi perpindahan tiang ke atas.

Kalantari (2012), mengkaji tentang beberapa jenis desain fondasi untuk tanah ekspansif yang memiliki kembang-susut tinggi sehingga analisis potensi pengembangan diperlukan untuk menentukan fondasi yang tepat pada jenis tanah ekspansif tersebut.

Puri (2012), menentukan penambahan nilai koefisien reaksi *subgrade* berdasarkan toleransi penurunan untuk sistem pelat terpaku pada tanah lunak. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) digunakan dalam menentukan lendutan pelat yang dianalisis dengan metode *BoEF* dan memperhitungkan nilai gesekan tiang (*friction pile*).

Puspasari (2013), mengkaji nilai lendutan, momen, dan gaya lintang sistem pelat terpaku pada tanah pasir menggunakan SAP 2000. Analisis dilakukan dengan memodelkan struktur pelat yang didukung dengan tiga variasi koefisien reaksi *subgrade* yaitu variasi  $\Delta k$ , variasi  $k_t, k_h, k_v$  dan variasi  $k'$ . Hasil analisis adalah variasi  $k_t, k_h, k_v$  yang lebih mendekati keadaan lapangan.

Puri (2013), menganalisis lendutan pelat terpaku pada model skala penuh dan komparasi dengan uji pembebanan, pelat terpaku menggunakan koperan. Untuk menghitung lendutan pelat digunakan teori balok diatas fondasi elastik dan dibandingkan dengan metode elemen hingga dengan menggunakan koefisien reaksi *subgrade* ekuivalen.

Sall (2013), meneliti tentang pengaruh nilai modulus elastis tanah pada sistem pelat beton tanpa tiang dan tanah sebagai elemen pegas (*springs*) pada perpindahan fondasi rakit. Pengamatan dilakukan terhadap interaksi antara stuktur dan tanah terutama pengaruh dari kekakuan tanah dan beton dengan menggunakan koefisien reaksi *subgrade* ( $k'$ ).

Diana (2015), melakukan studi eksperimen tentang akibat dari pemasangan tiang terhadap kenaikan pelat pada tanah ekspansif. Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa memperkuat pelat dengan tiang akan mengurangi nilai kenaikan, dengan panjang tiang 100 mm akan mereduksi 50% - 85% kenaikan pelat dan mereduksi sebanyak 30% gaya *uplift-pressure* daripada pelat tanpa tiang.

Diana (2017), menganalisis pengaruh perkuatan tiang terhadap kinerja dari sistem pelat terpaku pada tanah ekspansif. Hasil dari penelitian ini membuktikan adanya tiang dapat mereduksi kenaikan (*heave*) antara pelat dan tanah-dasar. *Heave* diprediksi dengan menggunakan hubungan antara perubahan kadar air tanah dan regangan vertikal dari data uji *oedometer*. Hubungan antara tiang dan pelat menghasilkan kenaikan yang lebih kecil daripada pelat tanpa tiang pada tanah ekspansif.

Waruwu (2017), meneliti tentang perilaku lendutan pada sistem pelat terpaku dengan tambahan timbunan pada tanah gambut (*peat soil*), penelitian ini menggunakan pembebanan tambahan berupa timbunan tanah dan memperhitungkan adanya penurunan akibat konsolidasi.

Puri (2017), menganalisis pengembangan kurva faktor perpindahan tiang untuk menentukan penambahan modulus reaksi *subgrade* pada sistem pelat terpaku, perbedaan pada penelitian ini terdapat pada model benda uji dengan tiang tunggal dan di modelkan diatas tanah lunak untuk mendapatkan kurva perpindahan baru yaitu menunjukkan bahwa penambahan tiang dibawah pelat

meningkatkan modulus reaksi tanah-dasar. Kurva faktor perpindahan tiang dari penelitiannya berguna untuk mengestimasi penambahan nilai  $k$ .

## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang memiliki potensi pengembangan dan penyusutan tinggi karena pengaruh kadar air (Hardiyatmo, 2014). Tanah ekspansif akan menyusut apabila kadar air berkurang dan mengembang saat kadar air bertambah. Ketika tanah lempung mengembang akan terjadi tekanan pengembangan lalu akan mengangkat bangunan di atasnya.

Menurut Muntohar (2014), beberapa kerugian yang disebabkan oleh tanah mengembang yaitu adanya pengembangan vertikal (*heave*) dan retak (*cracking*) permukaan jalan raya dan *buckling* pada perkerasan kaku, berkurangnya daya dukung dan kuat geser tanah, serta kelebihan tegangan lateral pada dinding penahan tanah.

Distribusi tanah lempung ekspansif dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sedimentasi dan geologi. Mineral *montmorillonite* terbentuk dari pelapukan abu vulkanik atau mineral silika utama seperti *feldspars* dan *pyroxenes* (Keller, 1957).

Mineral *montmorillonite* murni dapat mengembang 10 hingga 15 kali volume aslinya. Terdapat dua jenis mineral *montmorillonite*, yaitu *kalsium montmorillonite* dan *sodium montmorillonite (bentonite)*. Mineral *bentonite* memiliki nilai plastisitas yang sangat tinggi dan mempunyai batas cair ( $LL$ ) lebih dari 500%.

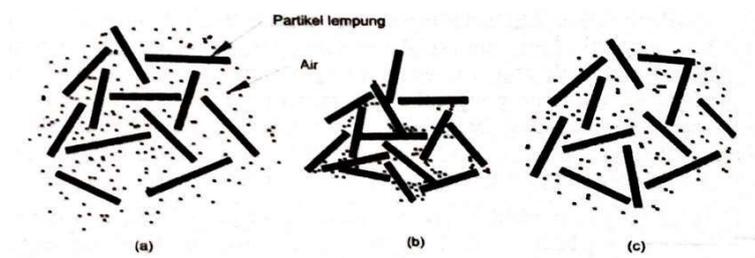
### 2.2.2. Pengembangan dan Penyusutan Tanah Ekspansif

Menurut Snethen (1984), Potensi pengembangan (*swelling potential*) merupakan perubahan volume / deformasi benda uji terhadap tinggi awal benda uji tanah dengan pengujian konsolidasi pada contoh tak terusik (*undisturbed*) pada kadar air dan kepadatan lapangan dan dibasahi hingga jenuh dengan beban sesuai tekanan *overburdent* ditempat.

Tanah lempung ekspansif memiliki potensi untuk menarik dan melepas air tergantung pada kadar air awal tanah dan kadar air relatif terhadap kadar-kadar air konsistensi pada batas cair, batas plastis dan batas susut.

Menurut Coduto (1994), pengembangan tanah akibat pengaruh dari perubahan tegangan permukaan dan osmotik dari lempung *montmorillonite* yang jenuh diperlihatkan dalam Gambar 2.1a. Jika tanah mengering maka air tersisa akan mendekat pada bidang singgung antar butiran dan membentuk menisci yang menghasilkan tegangan permukaan yang menarik partikel mendekat satu sama lain, sehingga menyebabkan penyusutan.

Tanah pada Gambar 2.1b. mempunyai daya tarik menarik yang besar terhadap air melalui metode osmosa. Pada kedudukan ini terdapat isapan tanah jika kemudian ada cukup air, isapan tanah akan menarik air kedalam ruang antar partikel sehingga tanah mengembang. Hal ini karena butiran tanah terdesak oleh air (Lihat Gambar 2.1c.).

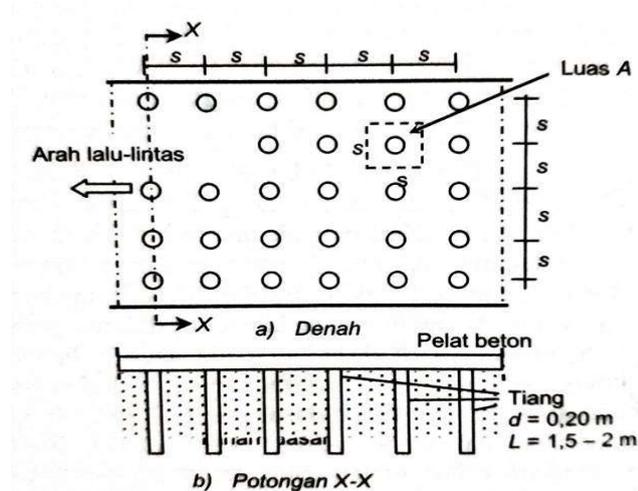


Gambar 2.1. Penyusutan dan pengembangan lempung ekspansif (Coduto, 1994).

### 2.2.3. Sistem Pelat Terpaku

Sistem pelat terpaku cocok digunakan pada perkerasan yang memiliki tanah dasar bermasalah contohnya tanah lempung ekspansif (memiliki kembang-susut tinggi) dan mengalami penurunan dan kenaikan tanah yang tidak seragam.

Hardiyatmo (2008) telah mengusulkan penyelesaian masalah untuk kerusakan perkerasan jalan akibat tanah lunak atau tanah ekspansif menggunakan perkerasan beton sistem pelat terpaku (*Nailed Slab System*). Sistem ini menggunakan perkerasan beton bertulang (tebal antara 12-20 cm) yang didukung oleh tiang-tiang beton mini (panjang 150 – 200 cm dan diameter 15 – 20 cm). Tiang-tiang dan pelat dihubungkan secara monolit untuk menciptakan suatu perkerasan yang kaku dan tahan terhadap deformasi tanah-dasar. Sistem pelat terpaku ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2017).

Hasil pembebanan pada pelat yang didukung tiang menunjukkan adanya reduksi penurunan yang signifikan oleh pemasangan tiang yang memaku pelat ke tanah-dasar (Hardiyatmo, 2009).

Pemasangan kelompok tiang juga berfungsi untuk menjaga agar pelat tetap dalam kontak yang stabil dengan lapis pondasi bawah sehingga tidak ada rongga-rongga dibawah pelat beton dan kekuatan struktur terjamin sesuai umur rencananya.

#### 2.2.4. Metode Evaluasi Kinerja Sistem Pelat Terpaku

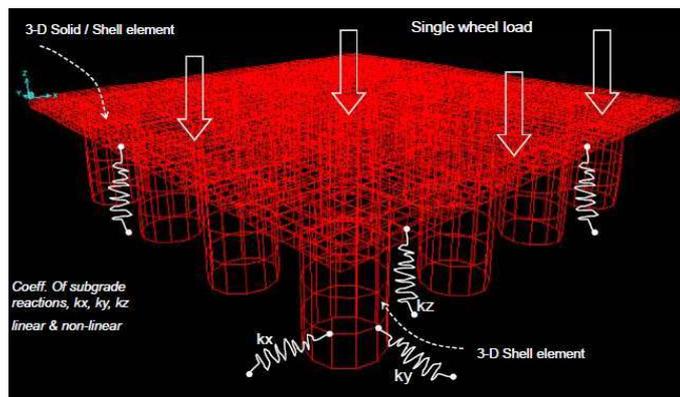
Menurut Hardiyatmo (2009), Untuk mengevaluasi kinerja sistem pelat terpaku dapat dilakukan dengan cara membebani pelat untuk mengetahui perilaku antara beban dan lendutan yang dinyatakan dalam modulus reaksi tanah dasar (*Modulus of Subgrade Reaction, k*).

Penentuan nilai  $k$  untuk pelat dengan tebal relatif tipis diperoleh dari hubungan tekanan dan lendutan yang merupakan lendutan merata di sepanjang pelat. Perhitungan lendutan pelat yang terjadi pada sistem pelat terpaku menggunakan teori balok pada fondasi elastik (*Beam on Elastic Foundation, BoEF*) (Hetenyi, 1974).

Apabila struktur pelat terpaku didukung oleh kelompok tiang dengan panjang tertentu maka akan terjadi reduksi lendutan akibat tiang. Maka, dalam analisis lendutan perlu memperhitungkan pengaruh kelompok tiang dengan menggunakan nilai  $k$  ekivalen ( $k'$ ).

### 2.2.5. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mendapatkan pendekatan praktis terhadap interaksi antara struktur dan tanah-dasar pada perencanaan perkerasan kaku (*rigid pavement*). Sistem Pelat Terpaku (*Nailed Slab System*) merupakan pengembangan dari Sistem Cakar Ayam Modifikasi. Suhendro (2006), mengembangkan analisis model cakar ayam modifikasi dengan solusi metode elemen hingga (*finite elemen method*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Pemodelan Sistem Cakar Ayam Modifikasi Metode Elemen Hingga 3-D (Suhendro, 2006).

Prosedur untuk analisis metode elemen hingga pada Sistem Cakar Ayam Modifikasi yaitu:

- Pelat dimodelkan sebagai elemen lentur, pipa cakar ayam menjadi elemen cangkang (*shell*) 3-D, Tanah-dasar sebagai elemen pegas (*spring*) vertikal dengan modulus reaksi tanah dasar ( $k_v$ ) dan tanah disekitar pipa sebagai pegas horizontal yang direpresentasikan dengan nilai koefisien reaksi tanah-dasar ( $k_h$ ).
- Setiap elemen dievaluasi menggunakan matriks kekakuan elemen dalam koordinat lokalnya seperti persamaan berikut:

$$[k_l^e] = \iiint_v [B]^T [E] dV \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan,  $[B]$  adalah matriks yang memberikan hubungan antara vektor regangan elemen  $\{\varepsilon\}$  dengan vektor perpindahan titik elemen  $\{d\}$ , sesuai dengan persamaan  $\{\varepsilon\} = [B]\{d\}$  dan  $[B] = [D][N]$ , matriks  $[D]$  adalah matriks operasi yang diferensial, dan  $[N]$  adalah matriks fungsi bentuk

hubungan antara vektor perpindahan elemen  $\{u\}$  dengan vektor perpindahan titik elemen  $\{d\}$ , sesuai persamaan  $\{u\} = [N]\{d\}$ .

- c. Selanjutnya,  $[k_i^e]$  tersebut ditransformasikan ke sistem koordinat global:

$$[k_g^e] = [T]^T [k_i^e] [T] \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan  $[T]$  adalah matriks transformasi elemen dari sistem koordinat local ke koordinat global.

Demikian pula halnya untuk vektor beban dan vektor nodal displacement:

$$\begin{aligned} \{P\}_{lokal} &= [T]\{P\}_{global} \\ \{d\}_{lokal} &= [T]\{d\}_{global} \dots\dots\dots \end{aligned} \quad (2.3)$$

Matriks-matriks  $[k_g^e]\{P\}_{global}^e$  maupun  $\{d\}_{global}^e$  untuk setiap elemen dapat di-assembly menjadi  $[K][P]$  dan  $\{D\}$  dari strukturnya, dan persamaan keseimbangan struktur dalam sistem koordinat global menjadi:

$$[K]\{D\} = \{P\} \dots\dots\dots (2.4)$$

- d. Persamaan (2.4), setelah kondisi batas beban  $\{P\}^e$  dan kondisi batas displacement  $\{D^k\}$  pada struktur diperhitungkan, dapat diselesaikan untuk memperoleh solusi nodal displacement dari struktur yang belum diketahui  $\{D^u\}$  maupun reaksi-reaksi nodal pada pegas-pegas vertikal dan horizontal tanah dasar  $\{P\}^r$ .

- e. Berdasarkan solusi nodal displacement  $\{D^u\}$  pada langkah (d), setelah ditransformasikan kembali ke sistem koordinat lokal  $\{d^e\}$  dengan besarnya tegangan  $\{\sigma\}$ , regangan  $\{\varepsilon\}$ , maupun gaya-gaya dalam untuk setiap elemen,  $\{p^e\}$  dapat dihitung sebagai berikut:

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} = [E][B]\{d^e\} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d^e\} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\{p^e\} = [k_{pegas}^e]\{d^e\} \dots\dots\dots(2.7)$$

Untuk distribusi tekanan tanah dibawah pelat beton Cakar Ayam Modifikasi dapat dievaluasi dengan mengalikan defleksi pelat di setiap titik dengan nilai koefisien reaksi *subgrade* vertikal ( $k_v$ ).

### 2.2.6. Modulus Reaksi Tanah-Dasar ( $k$ )

Perancangan perkerasan beton dengan Sistem Pelat Terpaku, diperlukan nilai modulus reaksi *subgrade* (vertikal) yang didefinisikan sebagai:

$$k = \frac{P}{\delta} \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan,

$k$  = modulus reaksi tanah-dasar ( $\text{kN/m}^3$ )

$p$  = beban persatuan luas pada pelat ( $Q/A$ ) ( $\text{kN/m}^2$ )

$Q$  = beban titik ( $\text{kN}$ )

$A$  = luas pelat beban ( $\text{m}^2$ )

$\delta$  = defleksi atau penurunan rata-rata pelat ( $\text{m}$ )

Untuk menentukan modulus reaksi tanah-dasar ( $k$ ), maka dilakukan uji beban pelat (*plate loading test*) pada permukaan tanah dasar. AASHTO T-222 menyarankan penentuan  $k$  yang didasarkan pada  $p = 10 \text{ psi} = 69 \text{ kN/m}^2$  yang menyebabkan lendutan tertentu sebagai berikut:

$$k = \frac{69}{\delta} \text{ (kN/m}^2\text{)} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan,

$p$  = beban persatuan luas pada pelat =  $69 \text{ (kN/ m}^2\text{)}$

$\delta$  = defleksi atau penurunan rata-rata pelat ( $\text{m}$ )

Pada pelat tipis, Hardiyatmo (2009) menyarankan menggunakan persamaan modulus reaksi tanah dasar :

$$k = \frac{P}{\delta_\alpha} \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan,

$p$  = beban persatuan luas pada pelat ( $Q/A$ ) ( $\text{kN/ m}^2$ )

$Q$  = beban titik ( $\text{kN}$ )

$A$  = luas pelat beban ( $\text{m}^2$ )

$\delta_\alpha$  = defleksi rerata atau penurunan rata-rata pelat ( $\text{m}$ )

Lendutan rerata ( $\delta_\alpha$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (lihat Gambar 2.3)

$$\delta_\alpha = \frac{1}{2L} \{ l_i (\delta_i + \delta_{i+1}) + l_{i+1} (\delta_{i+1} + \delta_{i+2}) + \dots + l_{n-1} (\delta_{i+1} + \delta_n) \} \dots (2.11)$$

dengan,

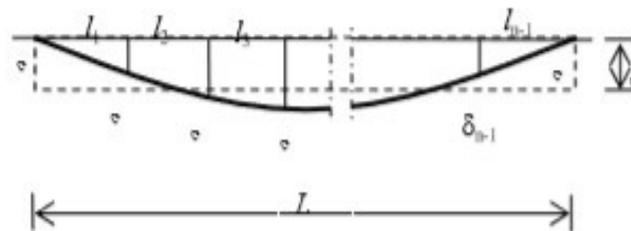
$\delta_\alpha$  = lendutan rerata pelat fleksibel (m)

$\delta_i$  = lendutan di titik ke-I dari pelat fleksibel (m)

i = nomor titik pengukuran 1 sampai n

$l_i$  = jarak masing-masing titik (m)

L = Panjang pelat yang menyentuh tanah (m)



Gambar 2.4. Penentuan lendutan rerata ( $\delta_\alpha$ ) pelat fleksibel (Hardiyatmo, 2009).

Tegangan rerata memperhitungkan luas kontak pelat dengan tanah. Perbedaan dari Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.10 terdapat pada hitungan tekanan ( $q$ ) ditentukan berdasarkan luas kontak efektif antara pelat dan tanah, dan lendutan ditentukan berdasarkan lendutan rerata pada pelat. Untuk beban pelat ukuran tertentu modulus reaksi tanah-dasar dinyatakan oleh persamaan (Teng, 1981) :

$$k_f = k_l \frac{B_l}{B_f} \dots \dots \dots (2.12)$$

dengan,

$k_f$  = modulus reaksi tanah-dasar pada pelat dengan lebar  $B_f$

$k_l$  = modulus reaksi tanah-dasar dari hasil uji beban pelat selebar  $B_l$

**2.2.7. Kenaikan Modulus Reaksi Tanah-Dasar Akibat Pengaruh Tiang**

Pemasangan tiang yang monolit pada pelat beton dapat menaikkan modulus reaksi *subgrade* ( $k$ ). Dalam perancangan Sistem Pelat Terpaku dengan metoda AASHTO, dibutuhkan nilai  $k$  akibat pengaruh dukungan tiang. modulus reaksi tanah-dasar ekivalen ( $k'$ ) didefinisikan sebagai modulus reaksi tanah-dasar yang memperhatikan kontribusi tiang dalam menahan gerakan perpindahan vertikal pelat yang dinyatakan oleh persamaan (Hardiyatmo, 2011):

$$k' = k + \Delta k \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan,

$k'$  = modulus reaksi tanah-dasar ekivalen ( $\text{kN/m}^3$ )

$k$  = modulus reaksi tanah-dasar saja ( $\text{kN/m}^3$ )

$\Delta k$  = kenaikan modulus reaksi tanah-dasar akibat pemasangan tiang ( $\text{kN/m}^3$ )

Pada saat pelat dibebani terjadi penurunan pelat sehingga tanah disekitar pelat juga turun. Namun, turunnya tiang lebih besar dibandingkan dengan penurunan tanah disekitarnya. Nilai penurunan relatif antara tanah dan tiang kecil, maka tahanan gesek tiang belum mencapai ultimit. Tahanan gesek tiang ditunjukkan pada persamaan :

$$Q_s = \alpha A_s f_s \dots\dots\dots (2.14)$$

Tahanan gesek satuan termobilisasi dinyatakan dalam persamaan :

$$R_s = \alpha f_s \dots\dots\dots (2.15)$$

dengan,

$\alpha$  = faktor perpindahan tiang

Nilai  $\alpha$  merupakan perbandingan antara perpindahan relatif antara tanah terhadap tiang ( $\delta_0$ ) dan penurunan pelat ( $\delta$ ) di atasnya seperti pada persamaan berikut :

$$\alpha = \delta_0 / \delta \dots\dots\dots (2.16)$$

Maka modulus gesek tiang ( $k_t$ ) didefinisikan sebagai reaksi perlawanan tiang yang termobilisasi pada penurunan tertentu dan dinyatakan pada persamaan dibawah ini :

$$k_t = R_s / \delta \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan,

$R_s$  = tahanan gesek tiang termobilisasi per satuan luas ( $\text{kN/m}^2$ )

$\delta$  = penurunan pelat (m)

Bentuk persamaan untuk kenaikan modulus reaksi tanah-dasar akibat pemasangan tiang pada pelat dengan luasan bujur sangkar dapat dilihat dalam persamaan berikut :

$$\Delta k = \frac{\delta_0 A_s}{\delta^2 s^2} f_s \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan,

$\Delta k$  = kenaikan modulus reaksi *subgrade* akibat pemasangan tiang (kN/m<sup>3</sup>)

$\delta_0$  = perpindahan relative antara tanah terhadap tiang (m)

$\delta$  = penurunan pelat (m)

$A_s$  = luas selimut tiang (m<sup>2</sup>)

$A(s)$  = luasan yang didukung satu tiang (m<sup>2</sup>)

$f_s$  = tahanan gesek tiang persatuan luas (kN/m<sup>2</sup>).

### 2.2.8. Pemodelan Tanah Sebagai Elemen Pegas (*spring*)

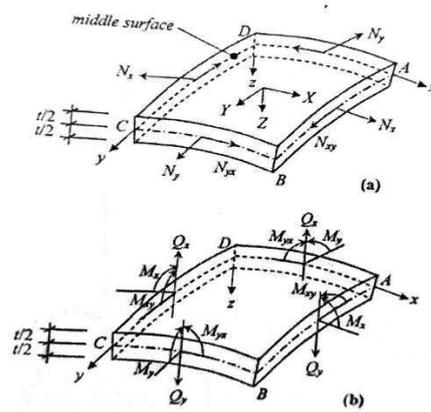
*Spring* dianggap mampu mewakili kondisi tanah di lapangan karena tanah mempunyai sifat linier dalam merespon beban, sehingga direpresentasikan sebagai modulus reaksi *subgrade* vertikal, dan tanah disekitar tiang dimodelkan sebagai *spring* horizontal yaitu merepresentasikan modulus reaksi *subgrade* horizontal. *spring* dimodelkan hanya mampu merepon tekan. Menurut Potts dkk (1993), *spring* dapat digunakan dalam analisis elemen hingga dalam bentuk 3 buah, yaitu :

- a. Dengan menempatkan 2 buah *nodel* pada *mesh*
- b. *Spring* dapat diaplikasikan sebagai *single nodel*
- c. *Spring* diaplikasikan secara menerus disepanjang bagian kondisi batas *mesh*.

### 2.2.9. Elemen *Shell* pada Metode Elemen Hingga

Menurut Cook dkk (1994), elemen *shell* digambarkan dengan ketebalan tipis dan bentuk permukaan bidang terpusatnya (*midsurface*). Beberapa pemodelan *shell* untuk model elemen hingga yaitu elemen datar kombinasi dari elemen membran dan pelat lentur, elemen lengkung menggunakan teori *shell* klasik serta elemen *mindlin* yang menggunakan rumus elemen pelat *mindlin* dengan elemen *shell* dianggap sebagai elemen *solid* tipis satu arah.

Pada penelitian ini akan digunakan pemodelan elemen *shell* datar yang menggunakan kombinasi antara elemen membran dan pelat lentur. Bentuk elemen *shell* menurut Gibson (1980) dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Elemen *shell* (Gibson, 1980 dalam Puspasari, 2013).