

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Penelitian Terdahulu

Permodelan numeris pada sistem pelat terpaku dengan menggunakan metode elemen hingga telah banyak dilakukan di bidang teknik sipil karena dapat memberikan pendekatan numerik pada sistem yang begitu kompleks (Gray, 2013). Metode ini merupakan salah satu alternatif analisis pendekatan pada perilaku lendutan pelat. Pendekatan dengan metode elemen hingga di bidang geoteknik dapat dilakukan menggunakan *software* SAP2000, Plaxis, Abaqus, dan lain-lain. Beberapa studi tentang metode pemodelan numeris dan uji laboratorium (Surat, 2011; Maske dkk, 2013; Elnaga, 2014; Khodair dan Ahmed, 2014; Puri dkk, 2015; Puri, 2015; Puri & Mildawati, 2019).

Surat (2011) menganalisa perkerasan kaku dan lentur dengan nilai CBR acuan 2% , tebal pelat 28cm dan beban 8T pada ruas jalan purwodadi dengan pembebanan tengah. Program yang digunakan dalam menganalisis struktur perkerasan ialah program analisa struktur SAP2000 dan BISAR 3.0. Dari hasil pemodelan menunjukkan bahwa perkerasan kaku memiliki stabilitas dan daya dukung yang lebih baik daripada perkerasan lentur

Maske, dkk (2013) membandingkan hasil analisis lendutan pada perkerasan kaku menggunakan metode elemen hingga dan metode empiris. Program yang digunakan dalam menganalisis perkerasan kaku dengan metode elemen hingga adalah *EverFE 2.25* dan untuk metode empiris menggunakan *Westergard's manual calculation*. Dari hasil perbandingan analisis antara metode elemen hingga dan metode empiris diperoleh metode alternatif yang dapat digunakan dalam menganalisis perkerasan kaku dengan lebih akurat adalah metode elemen hingga.

Elnaga (2014) menyajikan salah satu metode untuk desain dan analisis perkerasan kaku menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program LUSAS (*London University Stress Analysis System*) yang dibandingkan dengan metode PCA (*Portland Semen Assosiation*). Dari hasil perhitungan tegangan

lentur pada kondisi tidak simetris lebih mendekati dengan hasil PCA pada kondisi bidang tekannya.

Khodair dan Ahmed (2014) menyajikan sebuah analisis numerik mengenai hubungan tanah-tiang yang menerima beban aksial dan lateral dengan menggunakan *finite element model* (FEM). Program yang digunakan dalam menganalisis pengaruh beban lateral pada tiang yang tertanam pada tanah lempung adalah SAP2000 dan Abaqus. Dari hasil permodelan didapat bahwa semakin banyak jumlah lempung disekitar tiang dapat mengurangi *momen bending* dan *displacement* pada tiang dan meningkatkan kemampuan kolom untuk menahan beban.

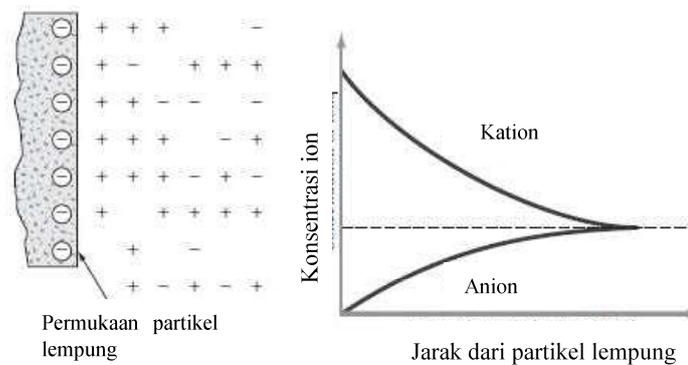
Yasir, dkk (2017) melakukan analisis dengan adanya penambahan sayap pada perkerasan kaku tanpa modifikasi sebagaimana telah diaplikasikan di lapangan berdasarkan analisis dengan Metode Elemen Hingga. Program yang digunakan dalam menganalisis metode elemen hingga adalah SAP2000. Hasil dari pemodelan ini didapatkan pengaruh koperan dalam mengurangi lendutan yang terjadi pada pembebanan sudut.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa variasi dimensi pelat terpaku, variasi jumlah tiang, jenis perkerasan, dan variasi panjang tiang dapat berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah pada pelat terpaku. Oleh karena itu, pemodelan pelat terpaku yang akan ditinjau yaitu, akibat pengaruh penambahan variasi modulus reaksi *subgrade* berdasarkan hasil pengamatan laboratorium, hasil koreksi tiang tunggal, dan analisis balik (*back analysis*).

## **2.2. Tanah Lempung Ekspansif**

Tanah ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang memiliki sifat kembang susut yang besar. Sifat khusus yang mengakibatkan potensi pengembangan pada tanah ekspansif cukup besar yaitu memiliki kapasitas pertukaran ion yang besar (Hatmoko, 2007). Tanah ekspansif akan mengalami perubahan volume ketika musim hujan dan menyusut kembali ketika musim kemarau dan pada umumnya kondisi ini diikuti dengan penurunan kemampuan daya dukung tanah terhadap beban. Akibat dari pengembangan atau penyusutan

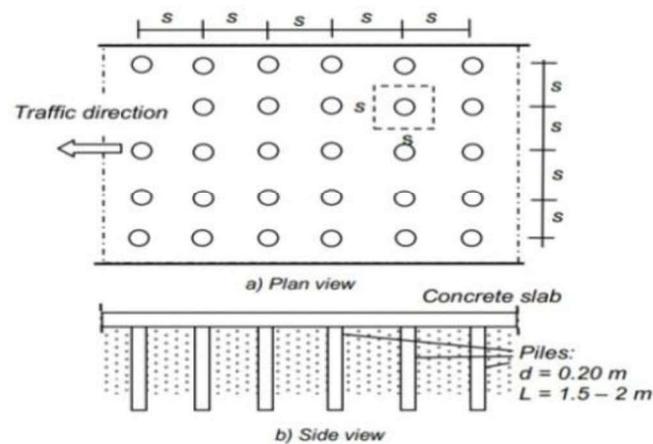
yang besar dan tidak seragam di beberapa titik sehingga menimbulkan perbedaan penurunan pada permukaan tanah (Muntohar, 2014). Tanah yang mudah mengalami perubahan kembang-susut adalah tanah yang banyak mengandung lempung dan kandungan mineral *montmorillonite* di dalamnya (Hardiyatmo, 2017). Potensi pengembangan pada tanah ekspansif disebabkan karena adanya *Diffuse Double Layer* (DDL). DDL merupakan permukaan yang memiliki muatan ion negatif pada partikel lempung dan ion positif dalam larutan dekat partikel. DDL yang bertumpuk diantara partikel lempung menyebabkan terjadinya peristiwa tekanan pengembangan (Nelson dkk, 2015). Ilustrasi bentuk partikel tanah ekspansif disajikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 *Diffuse double layer*

### 2.3. Sistem Pelat Terpaku

Sistem Pelat Terpaku merupakan salah satu alternatif desain perkerasan kaku untuk tanah ekspansif dengan tebal antara 12 – 20 cm yang didukung oleh *minipile* memiliki panjang antara 150 - 200 cm dan diameter antara 15 – 20 cm. Tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan sambungan tulangan. Interaksi yang terjadi antara tanah, pelat beton, dan *minipile* membuat perkerasan menjadi lebih kaku dan tahan terhadap deformasi tanah (Hardiyatmo, 2011). Adapun pemodelan pelat yang diperkuat tiang skala laboratorium telah dilakukan menggunakan tiang dengan diameter 4 cm dan panjang tiang 10 cm maupun 20 cm . Denah sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 2.2.

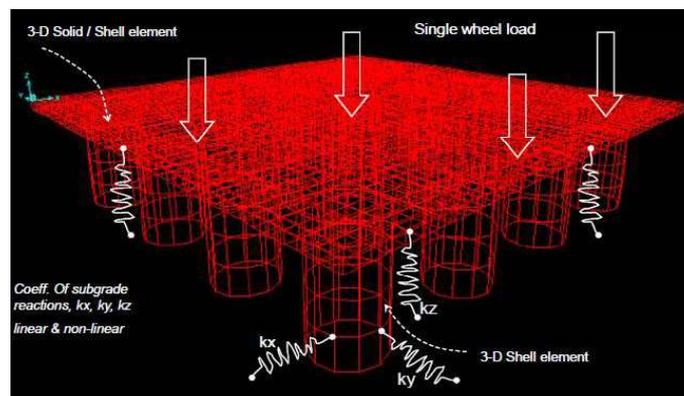


Gambar 2. 2 Sistem pelat terpaku (Hardiyatmo, 2011)

Tiang pada pelat beton berfungsi untuk menambah daya dukung *subgrade*. Peningkatan daya dukung *subgrade* akibat pengaruh penambahan tiang akan mengurangi tebal perkerasan kaku yang digunakan dan menambah kekakuan pada pelat beton.

#### 2.4. Pemodelan Elemen Hingga pada SAP2000

Metode elemen hingga (MEH) dapat menjadi salah satu alternatif untuk menghitung dan mendesain perkerasan kaku (Elnaga, 2014). Sistem pelat terpaku merupakan hasil pengembangan dari sistem cakar ayam modifikasi (CAM) dengan tiang pendek (Puri, dkk., 2015). Analisis CAM dengan model elemen hingga telah dikembangkan menggunakan bantuan program SAP2000 (Suhendro dan Hardiyatmo, 2005). Pemodelan CAM pada SAP2000 disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pemodelan CAM 3-D menggunakan SAP2000 (Suhendro dan Hardiyatmo, 2005)

Tahapan untuk memodelkan CAM pada program SAP2000 dibagi menjadi 5 tahapan dasar (Suhendro dan Hardiyatmo, 2005) :

1. Diasumsikan pelat beton menjadi elemen *bending plate*, tiang CAM sebagai elemen *shell-thin*, *subgrade* sebagai elemen pegas vertikal ( $k_v$  dan  $\Delta k_v$ ), tanah disekitar cakar dimodelkan sebagai elemen *solid 3D*.
2. Untuk beberapa elemen, yaitu elemen *bending plate*, *shell*, pegas vertikal, dan elemen *solid 3D*, perlu dilakukan evaluasi menggunakan matriks kekakuan elemen pada koordinat lokal dengan persamaan:

$$[k_\ell^e] = \iiint_V [B]^T [E][B] dV \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan  $[B]$  merupakan matriks yang menunjukkan hubungan antara vektor regangan elemen  $\{\varepsilon\}$  dengan pusat perpindahan elemen  $\{d\}$ , sesuai berdasarkan persamaan  $\{\varepsilon\} = [B]\{d\}$  dan  $[B] = [D][N]$ , dimana matriks  $[D]$  merupakan matriks operator diferensial, dan  $[N]$  merupakan matriks bentuk fungsi yang mengkorelasikan hubungan antara *vektor* perpindahan elemen  $\{u\}$  dengan vektor pusat perpindahan elemen  $\{d\}$ , sesuai dengan persamaan  $\{u\} = [N]\{d\}$ .

Kemudian, matriks  $[k_\ell^e]$  dapat ditransformasikan ke dalam koordinat global :

$$[k_\ell^e] = [T]^T [k_\ell^e] [T] \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan matriks  $[T]$  merupakan matriks hasil transformasi elemen dari koordinat lokal ke koordinat global. Demikian halnya dengan vektor beban dan vektor pusat perpindahan :

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

3. Beberapa matriks seperti  $[k_\ell^e]$ ,  $\{P\}_{global}^e$ ,  $\{d\}_{global}^e$  dapat dikumpulkan menjadi  $[K]$ ,  $\{P\}$ , dan  $\{D\}$  dari strukturnya, dan persamaan keseimbangan struktur dalam sistem koordinat global adalah sebagai berikut :

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

4. Dari persamaan sebelumnya, setelah batas  $\{P\}^e$  dan batas perpindahan  $\{D^k\}$  selesai diperhitungkan, dapat diselesaikan kondisi batas tersebut untuk memperoleh sentral perpindahan yang belum diketahui dari struktur  $\{D^u\}$  maupun reaksi pada pegas vertikal pada tanah dasar  $\{P\}^r$ .
5. Berdasarkan sentral perpindahan  $\{D^u\}$  pada langkah sebelumnya, setelah ditransformasikan kembali ke sistem koordinat lokal  $\{d^e\}$  dengan besaran tegangan  $\{\sigma\}$ , regangan  $\{\varepsilon\}$  dan gaya dalam untuk setiap elemen pelat, cangkang, serta gaya pegas vertikal  $\{p^e\}$  dapat ditunjukkan pada persamaan berikut :

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

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

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

Distribusi tegangan tanah yang berada di bawah pelat Cakar Ayam dapat dievaluasi dengan mengalikan lendutan pelat di tiap titik dengan nilai modulus reaksi *subgrade* ( $k_v$ ).

**2.4.1. Modulus Reaksi *Subgrade***

Modulus reaksi *subgrade* merupakan nilai perbandingan dari beban tiap satuan luasan dibagi dengan nilai penurunan atau lendutan rata-rata (Hardiyatmo, 2017a). Untuk mendapatkan nilai modulus reaksi *subgrade* ( $k$ ), maka perlu dilakukan uji beban pelat (*plate loading test*). Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai modulus reaksi *subgrade* adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 2009):

$$k_v = \frac{p}{\delta} \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan,

- $p$  = beban persatuan luas pada pelat ( $\text{kN/m}^2$ ),
- $\delta$  = defleksi atau penurunan rata-rata pelat (m).

Nilai modulus reaksi *subgrade* yang dianjurkan oleh AASHTO T-222, didasarkan pada nilai  $p = 10 \text{ psi} = 69 \text{ kN/m}^2$  yang bisa menentukan lendutan tertentu dengan persamaan berikut:

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

dengan,

- $p$  = beban persatuan luas pada pelat ( $\text{kN/m}^2$ ),
- $\delta$  = defleksi atau penurunan rata-rata pelat (m).

Modulus reaksi *subgrade* vertikal untuk pelat fleksibel dianjurkan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hartono, 2013) :

$$k_v = \frac{Q / A_c}{\delta_a} \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan,

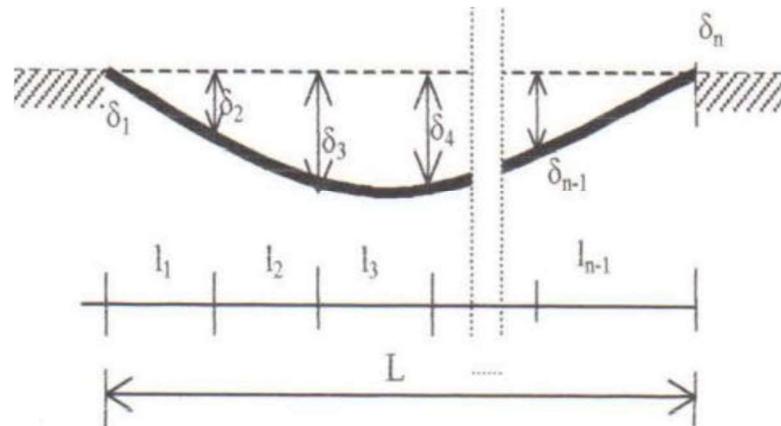
- $Q$  = Beban pada pusat pelat (kN),
- $A_c$  = Luas bidang tekan ( $\text{m}^2$ ),
- $\delta_a$  = Lendutan rerata pelat (m),

Untuk menentukan besar lendutan rata-rata pada pelat, maka nilai lendutan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.11). Skema perhitungan lendutan rerata pelat fleksibel dapat dilihat pada Gambar 2.4.

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

dengan,

- $L$  = Panjang pelat fleksibel (m),
- $l_i$  = Lebar pias ke-i (m),
- $\delta_i$  = Lendutan pada titik ke-i (m).



Gambar 2. 4 Skema lendutan rata-rata pelat (Hartono, 2013)

#### 2.4.2. Kenaikan Modulus Reaksi *Subgrade* akibat Penambahan Tiang

Dalam mendesain Sistem Pelat Terpaku dibutuhkan nilai modulus reaksi *subgrade* akibat penambahan tiang. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) didefinisikan sebagai Modulus reaksi *subgrade* yang memperhitungkan pengaruh tiang dalam menahan penurunan pada pelat yang dinyatakan dalam persamaan (Hardiyatmo, 2017a) :

$$k' = k + \Delta k \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan,

$k'$  = Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $\text{kN/m}^3$ ),

$k$  = Modulus reaksi *subgrade* pada pelat ( $\text{kN/m}^3$ ),

$\Delta k$  = Kenaikan modulus reaksi *subgrade* akibat penambahan tiang ( $\text{kN/m}^3$ ).

Menurut Hardiyatmo (2011), Pada saat proses pembebanan pada pelat terjadi penurunan tiang dan diikuti dengan penurunan pada tanah disekitar pelat. Namun, besarnya penurunan tiang lebih besar daripada penurunan pada tanah disekitarnya. Nilai penurunan yang relatif kecil antara tanah dan tiang, maka diasumsikan tahanan gesek pada tiang belum sepenuhnya mencapai maksimum. Nilai tahanan gesek tiang dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$Q_s = \alpha A_s f_s \dots\dots\dots (2.13)$$

Untuk tahanan gesek tiang satuan yang termobilisasi dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$R_s = \alpha f_s \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan,

$\alpha$  = faktor perpindahan tiang.

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

$$\alpha = \frac{\delta_0}{\delta} \dots\dots\dots (2.15)$$

Nilai modulus gesek tiang ( $k_t$ ) merupakan sebuah reaksi perlawanan tiang yang termobilisasi pada penurunan tertentu dan dinyatakan dengan persamaan :

$$k_t = \frac{R_s}{\delta} \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan,

$R_s$  = Tahanan gesek tiang termobilisasi (kN/m<sup>2</sup>),

$\delta$  = Penurunan pada pelat (mm).

Dari persamaan sebelumnya didapatkan bentuk persamaan untuk menghitung kenaikan reaksi *subgrade* akibat penambahan tiang pada pelat beton yang dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$\Delta k = \left( \frac{\delta_0 A_s}{\delta^2 S^2} \right) f_s \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan,

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

$\delta_0$  = Penurunan relatif antara tanah terhadap tiang (m),

$\delta$  = Penurunan yang terjadi pada pelat (m),

$A_s$  = Luas selimut (m<sup>2</sup>),

- A = Luas bidang tekan satu tiang (m<sup>2</sup>),
- f<sub>s</sub> = Tahanan gesek tiang (kN/m<sup>2</sup>).

**2.4.3. Elemen Shell sebagai Pemodelan Pelat Beton**

Element *shell* merupakan permukaan lengkung dalam ruang yang didefinisikan berdasarkan geometris digambarkan dengan ketebalan dan bidang tengah permukaan (Cook, 1994). Pemodelan elemen *shell* pada metode elemen hingga diterapkan pada 3 kondisi, yaitu:

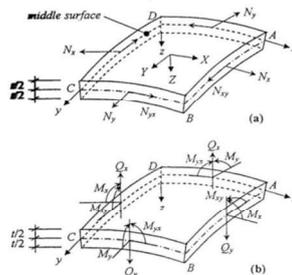
1. Elemen *shell*, sebagai sebuah kombinasi elemen membran dan elemen lentur
2. Elemen *shell*, sebagai elemen lengkung berdasarkan teori *shell* klasik.
3. Elemen *shell*, sebagai elemen solid dengan ketebalan yang minim satu arah.

Pada SAP2000, elemen *shell* diasumsikan sebagai kombinasi elemen membran dan elemen lentur yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Hubungan yang terjadi pada elemen *shell* berupa hubungan tegangan dan *displacement* yang disajikan dalam persamaan (2.5):

$$\left[ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \right]^T = \Sigma B_i \left[ u_i \ v_i \ w_i \ \alpha_i \ \beta_i \right]^T \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan,

- $\varepsilon$  = notasi regangan normal,
- $\gamma$  = notasi regangan geser,
- [B] = merupakan matriks *strain-displacement*,
- $u, v, w$  = notasi *displacement* translasi,
- $\alpha, \beta$  = notasi *displacement* rotasi.



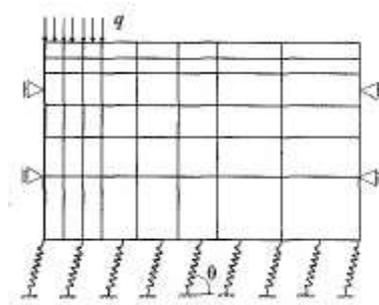
Gambar 2. 5 Elemen *shell* segi empat (Gibson 1980, dalam Diana, 2011)

#### 2.4.4. Elemen *Spring* sebagai Pemodelan Tanah

Elemen *spring* merupakan alternatif penggunaan elemen lapisan untuk memodelkan komponen-komponen struktural yang menahan gaya aksial (Potts dkk., 1999). *Spring* diasumsikan sebagai sebuah konstanta kekakuan ( $k_s$ ) dan diterapkan dalam model elemen hingga dengan 3 kondisi, yaitu:

1. *Spring* berada diantara 2 nodal dalam *mesh* elemen
2. *Spring* diterapkan sebagai *single nodule*
3. *Spring* diterapkan menerus sepanjang bagian daerah batas *mesh*

Pemodelan *spring* yang diasumsikan berada menerus sepanjang bagian daerah batas mesh dapat dilihat pada Gambar 2.6 yang memperlihatkan tiang tunggal sebagai sebuah konstanta *spring* yang bekerja pada dasar daerah *mesh*.



Gambar 2. 6 *Spring* diterapkan sepanjang batas *mesh* (Potts dkk., 1999)