

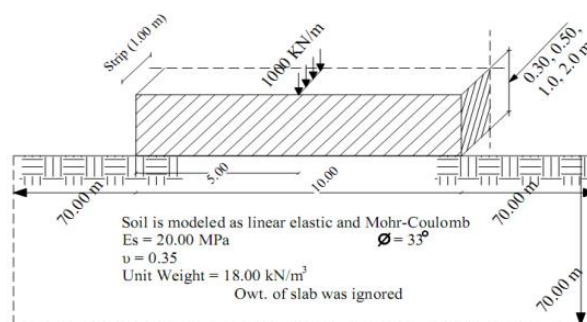
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Modulus reaksi tanah dasar merupakan nilai tekanan dalam satuan massa per luasan tiap meter (Hardiyatmo, 2017). Hardiyatmo (2011) mendefinisikan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen sebagai modulus reaksi tanah dasar yang memperhatikan pengaruh penambahan tiang dalam menahan gaya vertikal yang terjadi.

Farouk & Farouk (2014) melakukan pengujian pelat pondasi bangunan yang diasumsikan sebagai koefisien pegas K (kN/m). Nilai ini dianggap sama dengan modulus reaksi tanah dasar k_v (kN/m²/m). Nilai k_v yang berbeda memberi efek yang signifikan terhadap nilai penurunan yang terjadi. Perbedaan penurunan disebabkan tidak meratanya tegangan di bawah pelat. Struktur tanah juga menyebabkan gaya normal di sekitar pelat berubah. Perubahan gaya ini menyebabkan tegangan dan penurunan tiang mengalami perubahan dan berakibat pada berubahnya nilai k_v . Analisa numeris dilakukan berdasarkan teori Winkler dan teori elastik non elastik. Pemodelan untuk analisa dapat dilihat pada Gambar 2.1. Kekakuan bahan, kondisi tanah, level beban, struktur atas, dan dimensi telapak memberikan pengaruh terhadap nilai modulus elastisitas.



Gambar 2.1 Pemodelan telapak.

Jenis pondasi yang digunakan mempengaruhi nilai k_v yang dihasilkan. Pondasi yang terlalu fleksibel menghasilkan persebaran k_v yang terpusat di tengah pondasi telapak. Akan tetapi, pondasi yang fleksibel memberikan distribusi k_v yang

merata. Penggunaan pondasi semi kaku menghasilkan persebaran k_v yang terpusat di tepi dan rendah di bagian tengah. Hasil analisa menunjukkan bahwa teori elastik non elastik untuk menentukan nilai k_v menunjukkan nilai lendutan yang lebih mendekati hasil pengamatan. Hasil analisa pada *footing plate system* menunjukkan momen yang melebihi batas.

Simulasi *plate loading test*, analisa elemen hingga dengan ABAQUS, dan komparasi perbandingan numerik dengan studi kasus dipilih Naeini & Taherabadi (2015) untuk mengetahui nilai modulus reaksi tanah dasar. Pengujian bertujuan untuk mengetahui nilai lendutan, sehingga tidak memerlukan lagi pengujian *Plate Loading Test (PLT) in situ*. Hasil pemodelan memberikan hasil yang lebih besar dari pengujian *in situ* PLT. Perubahan inisial dan kondisi tekanan sekitar benda uji menghasilkan nilai yang berbeda dengan analisa numerik.

Farouk & Farouk (2014) memberikan hasil analisa perbandingan daya dukung dengan dan tanpa memperhatikan modulus reaksi tanah dasar. Penggunaan k_v memberikan nilai yang lebih relevan jika dibandingkan dengan analisa tanpa nilai k_v . Kekakuan dan material yang digunakan sebagai pondasi pelat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap besaran nilai k_v . Analisa linear model Mohr-Coloum memberikan nilai yang tidak relevan pada sisi pelat pondasi, sedangkan analisa non linear memberikan hasil yang lebih relevan. *Plate loading test* tidak sesuai apabila kekakuan pelat dan pondasi tidak sama. Sehingga perlu dilakukan modifikasi pondasi yang digunakan untuk memberikan hasil yang sesuai.

Putri, dkk., (2012) melakukan penelitian untuk mengetahui nilai modulus reaksi tanah dasar dan modulus elastisitas kemudian dibandingkan dengan nilai *California Bearing Ratio (CBR)* dan metode elemen hingga. Respon tekanan-perpindahan tanah dalam cetakan CBR disimulasikan menggunakan model Cosmosworks FEM di mana tanah, plunger beban, dan cetakan baja CBR. Korelasi Modulus Elastisitas (E) dengan California Bearing Ratio (CBR) dikembangkan berdasarkan sifat elastis dari sampel tanah. Selanjutnya, korelasi antara E dan CBR diusulkan. Dengan menggunakan nilai E, modulus reaksi tanah dasar dapat dihitung dan juga sebaliknya. CBR diharapkan menyederhanakan upaya dalam penentuan modulus reaksi tanah dasar yang digunakan dalam desain pondasi, struktur tanah interaksi, desain formasi jalan raya dll.

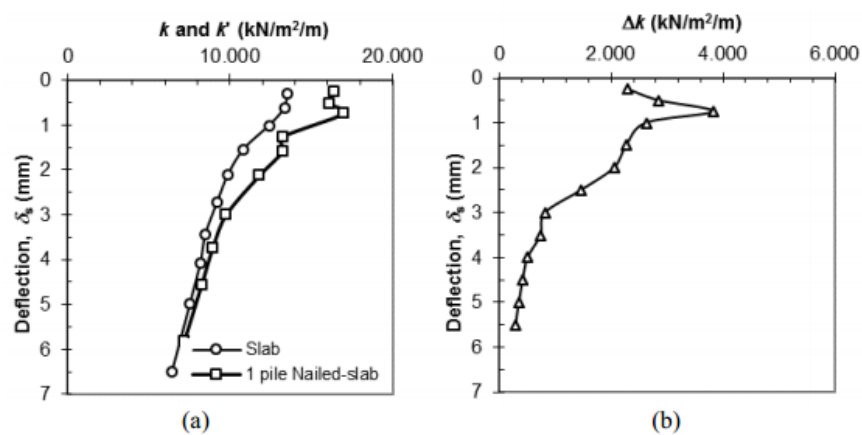
Marto, dkk. (2012) melakukan analisa dengan *software* plaxis pada pelat lingkaran yang diperkuat dengan tiang untuk mengetahui nilai modulus reaksi tanah dasar pada tanah berpasir yang diberi beban merata di sebagian bentang. Pemodelan dilakukan pada tanah jenuh dan kering. Selain dengan menggunakan *software* plaxis, analisa dilakukan juga dengan menggunakan pendekatan dari Terzaghi. Hasil analisa menunjukkan k_v hasil analisa dengan persamaan Terzaghi memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan analisa menggunakan plaxis. Pada kondisi kering, nilai k_v memiliki besaran paling tinggi. K_v tanah basah lebih kecil karena air mereduksi kekuatan dari tanah. Hasil penelitian juga menunjukkan, penurunan yang terjadi berbanding lurus dengan tekanan yang terjadi.

Moayed & Janbaz (2015) melakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh ukuran tiang terhadap nilai modulus reaksi tanah dasar. Pemodelan dengan *software* dilakukan dengan plaxis 3D. Analisa nilai k_v menggunakan persamaan Terzaghi dan didasarkan pada teori Winkler.

Penurunan yang terjadi menunjukkan nilai lendutan sebanding dengan beban yang diberikan. Pemodelan di laboratorium menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda antara persamaan Terzaghi dengan analisa dengan *software* plaxis. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Moayed & Janbaz (2015), lendutan hasil pemodelan memiliki nilai yang lebih kecil, akan tetapi keduanya memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Berdasarkan pengujian juga dapat diketahui bahwa k_v Terzaghi memiliki nilai yang lebih besar seiring dengan bertambahnya dimensi tiang yang digunakan.

Modulus reaksi tanah dasar digunakan untuk analisa lendutan yang terjadi pada pelat yang berada di atas tanah. Nilai modulus tanah dasar dapat ditingkatkan dengan menambahkan tiang-tiang di bawah pelat sebagai pengaku. Penambahan tiang-tiang ini dikenal dengan nama sistem pelat terpaku (*nailed slab system*). Sistem pelat terpaku merupakan pengembangan dari sistem pondasi cakar ayam. Puri (2017) melakukan pengujian pembebanan pada tanah lempung lunak dengan pelat di atasnya untuk mendapatkan nilai modulus reaksi tanah dasar (k_v). *Prototype* dipasang secara monolit pada lempung lunak menghasilkan nilai lendutan yang berbeda-beda.

Pemodelan menggunakan tiang tunggal. Penambahan nilai modulus reaksi tanah dasar didapatkan dari pemasangan tiang pada pelat. Pembacaan penurunan akibat bertambahnya beban digunakan untuk analisa penambahan nilai . Beban pada plat ditempatkan di pusat pelat. Nilai yang didapatkan digunakan untuk analisa lendutan. Nilai modulus reaksi tanah dasar dan penambahan modulus reaksi tanah dasar ditunjukkan pada gambar 2.2(a) dan gambar 2.2(b). Lendutan yang didapat kemudian dibandingkan dengan hasil pemodelan skala penuh. Lendutan hasil analisa dengan pemodelan skala penuh menghasilkan nilai yang positif atau mendekati kenyataan di lapangan.



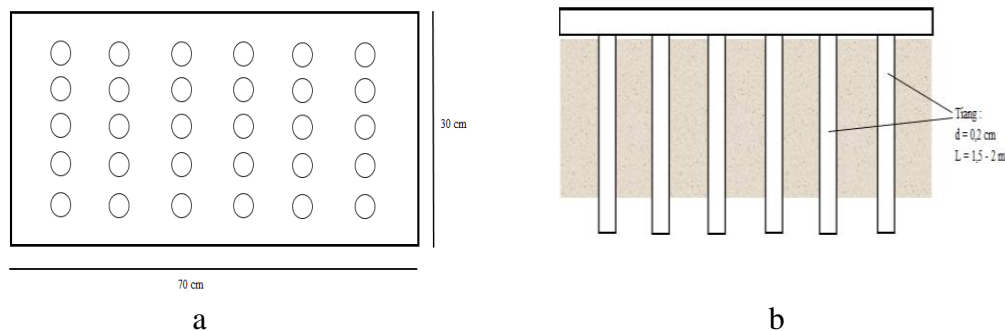
Gambar 2.2 Modulus reaksi tanah dasar (a) distribusi k dan k' (b) distribusi Δk

Modulus reaksi tanah dasar yang didapat digunakan untuk menghitung lendutan pelat dengan dan tanpa tiang. Puri dkk. (2013) melakukan pemodelan sistem pelat terpaku (*nailed slab system*) pada tanah lempung lunak. Pemodelan bertujuan untuk mengetahui efektifitas tiang dengan berbagai macam jarak dan panjang yang digunakan diakibatkan bertambahnya nilai modulus reaksi tanah dasar. Teori *Beam on Elastic Foundation* digunakan untuk analisa deformasi pelat dengan memasukan modulus reaksi tanah dasar dan penambahan modulus reaksi tanah dasar (Δk). Hasil analisa kemudian dibandingkan dengan pemodelan 2D dengan *software* Plaxis.

Hasil pengujian menunjukkan semakin dekat jarak antar tiang, maka semakin besar nilai penambahan modulus reaksi tanah dasar. Semakin panjang tiang yang digunakan juga menyebabkan kenaikan penambahan nilai modulus reaksi tanah

dasar. Nilai modulus reaksi tanah dasar berbanding lurus dengan kekakuan pelat. Nilai ini berlaku untuk beban sentris.

Diana, dkk (2017) melakukan pemodelan skala kecil tanah lempung ekspansif dengan menggunakan sistem pelat terpaku. Letak pondasi yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 2.3(a) dan sisi samping terlihat pada Gambar 2.3(b). Pengujian ini membandingkan regangan vertikal tanah akibat pengembangan. Variasi tiang yang digunakan ada dua, pertama tiang monolit dengan pelat, kedua tiang terpisah dengan pelat.

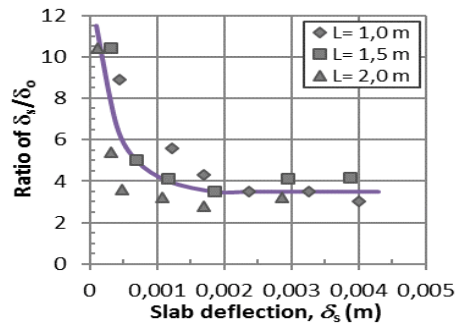


Gambar 2.3 (a) Model pelat tampak atas, (b) Model pelat tampak samping

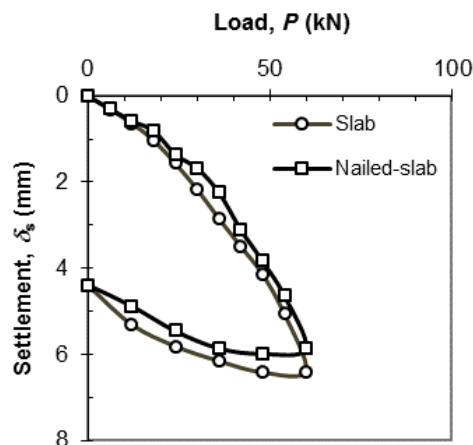
Penggunaan *mini piles* dapat mengurangi kerusakan yang terjadi pada pelat. Sistem pelat terpaku juga mengurangi gaya angkat yang terjadi. Penggunaan tiang monolit memberikan daya dukung yang lebih baik dari pada tiang yang dipasang terpisah dengan pelat

Nailed slab system tidak hanya digunakan sebagai sistem perkuatan pada tanah lempung ekspansif. Puri (2017) melakukan pengujian pada tanah lempung lunak dengan menggunakan pondasi tiang sebagai sistem perkuatan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiang tunggal yang dipasang monolit dengan pelat, kemudian dengan variasi nilai *modulus subgrade reaction* dicari nilai lendutan yang terjadi. Apabila telah didapatkan nilai lendutannya, nilai ini dibandingkan dengan nilai lendutan pada pelat dengan kelompok tiang.

Analisa dilakukan dengan melihat defleksi yang terjadi antara tiang dengan tanah (δ_0) dan defleksi dari pelat (δ_s). Hardiyatmo (dalam Puri 2017), memberikan grafik hubungan antara rasio δ_s/δ_0 dengan defleksi dari pelat (δ_s) seperti pada gambar 2.4. Hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi seperti disajikan pada gambar 2.5.



Gambar 2.4 Grafik hubungan rasio δ_s/δ_0 dengan defleksi dari pelat (δ_s)



Gambar 2.5 Kurva hubungan beban dan penurunan yang terjadi

Kurva di atas menunjukkan bahwa penggunaan tiang dapat mereduksi penurunan yang terjadi. Kemudian dari hasil analisa didapat nilai Δk dan k . Bertambahnya nilai modulus reaksi *subgrade* juga mengindikasikan bahwa tiang memberi kontribusi untuk menahan supaya pelat tidak mengalami lendutan yang besar. Nilai modulus reaksi *subgrade* tiang berkelompok 1,14 kali dari tiang tunggal.

Puri dkk., (2014) melakukan penelitian skala penuh mengenai sistem pelat terpaku di atas tanah dasar lempung lunak. Sistem pelat terpaku dimodelkan di atas tanah lunak berukuran 6m x 3,54 m. Pelat yang digunakan memiliki tebal 0,15 meter dengan tiang berdiameter 0,15 meter berjumlah 15 tiang. Tiang dipancang hingga kedalaman 1,2 m dan 1,5 m. Tiang dipasang monolit dengan pelat. Di kedua sisi tanah diberi dinding pembatas yang terbuat dari beton. Beban yang digunakan berupa beban arah vertikal di bagian tengah, pinggir, dan beban sendiri. Pelat

dibebani di beberapa titik, yaitu beban sentris, beban di pinggir pelat, dan beban di sembarang titik.

Hubungan beban dan penurunan ($P - \delta$) yang terjadi pada saat pelat dibebani di bagian tengah pelat menunjukkan hubungan linear hingga beban mencapai 40 kN. Respon pelat yang diperkuat tiang menunjukkan nilai yang positif. Setelah beban mencapai titik maksimum, beban diturunkan kembali (*unloading*) hingga beban kembali 0 (nol). Penurunan bernilai nol setelah semua beban diangkat, dengan kata lain, pelat kembali ke bentuk semula. Sifat ini menunjukkan bahwa struktur yang digunakan (tiang, pelat, konektor pelat, dan *concrete barrier*) memberikan respon yang baik dalam menahan gaya yang terjadi.

Beban yang diletakan di sisi pelat menunjukkan sifat yang sama dengan beban di tengah (sentris), hanya saja defleksi terbesar terjadi di salah satu sisi (di bawah beban). Pelat dengan beban di salah satu sisi, hanya mampu menerima beban hingga 120 kN.

Unloading dilakukan setelah pelat menerima gaya maksimal yang mampu ditahan. *Unloading* dilakukan secara bertahap, pada angka 80 kN pelat menunjukkan sifat linear elastik. Pelat kembali ke bentuk semula (lendutan nol) pada saat beban nol. Nilai ini menunjukkan bahwa struktur yang digunakan memberikan respon yang baik dan mampu menahan gaya/ beban yang terjadi di salah satu sisi pelat.

Pengujian plate loading test pada pelat berukuran kecil dilakukan untuk mengetahui nilai lendutan yang terjadi (Hardiyatmo, 2011). Kemudian hasil lendutan dilaboratorium dibandingkan dengan analisa numeris menggunakan metode *Beam on Elastic Foundation*. Hasil pengujian menunjukkan semakin besar beban yang diberikan, lendutan yang terjadi pada pelat semakin besar. Berdasarkan pengamatan, maka dapat dicari nilai k_v , nilai k_v hasil analisa menunjukkan nilai yang besar pada lendutan yang kecil.

Lendutan yang terjadi diamati pada dua keadaan, yaitu beban di pusat dan beban di tepi. Baik pengamatan maupun hasil analisa dengan metode *Beam on Elastic Foundation*, lendutan terbesar terjadi di bawah beban dan semakin kecil ketika jauh dari baban. Hasil analisa juga menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda antara lendutan analisa maupun pengamatan. Berdasarkan hasil tersebut, maka teori

Beam on Elastic Foundation dapat digunakan untuk analisa lendutan yang terjadi pada pelat.

Nilai modulus reaksi tanah dasar dan lendutan pada pelat telah banyak dilakukan dengan berbagai metode sehingga telah mendapatkan perbandingan yang bermacam-macam. Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara pengujian di laboratorium dan analisa. Hardiyatmo (2011) telah melakukan penelitian untuk membandingkan lendutan yang terjadi dan modulus reaksi tanah dasar menggunakan metode *Beam on Elastic Foundation* dan pengujian di laboratorium dengan variasi letak beban dan pada kondisi tanah basah. Sedangkan pada penelitian ini, penurunan didasarkan pada beban di pusat tiang dan dilakukan untuk mengetahui nilai modulus reaksi tanah dasar pada kondisi tanah kering dan basah.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Tanah lempung ekspansif

Menurut Hardiyatmo (2017), tanah ekspansif (*expansive soil*) merupakan istilah untuk tanah yang mempunyai potensi kembang-susut apabila kadar air yang terkandung didalamnya mengalami perubahan. Pengurangan kadar air mengakibatkan tanah mengalami penyusutan. Sebaliknya, jika kadar air bertambah maka tanah akan mengalami pengembangan. Tanah-tanah dengan tingkat pengembangan tinggi pada umumnya banyak mengandung mineral lempung, terutama mineral *montmorillonite*. Lempung berasal dari sedimen yang diendapkan sehingga tanah ini sering tercampur dengan mineral lain yang bukan lempung.

Komposisi mineralogi lempung sebagian besar terdiri dari mineral kristalin dengan bentuk lembaran-lembaran. Akibat gaya tarik-menarik dan ikatan antar lembaran, kohesi tanah mengembang. Mineral lempung berasal dari perubahan diagenetik (*diagenetic alteration*) mineral yang sudah ada sebelumnya, sehingga memiliki bentuk yang sangat kecil akan tetapi memiliki luasan yang besar. Faktor-faktor diagenetik tanah lempung berupa pemanasan secara fisik dalam jangka waktu yang lama dan perubahan kimiawi dari tanah karena perubahan tekanan *overburden* atau kondisi lingkungan air tanah. Faktor diagenetik umumnya digambarkan dalam

fenomena ikatan antar partikel akibat kristalisasi ulang dari kontak antara mineral-mineral lempung pada tekanan overburden yang besar, atau oleh sementasi sebagai hasil pengendapan bahan perantara dari air tanah. Perubahan dimulai dari satu titik, kemudian menyebar ke seluruh bagian tanah.

Lempung dibagi menjadi dua, yaitu lempung aktif dan lempung tak-aktif. Lempung aktif cenderung memiliki sifat pengembangan yang tinggi sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan di atasnya. Pembagian ini didasarkan pada nilai aktifitas (A) lempung. Aktifitas (A) sering digunakan untuk memperkirakan jenis mineral lempung dan derajat plastisnya, sebagaimana dituliskan dalam Persamaan 2.1.

$$A = \frac{PI}{C} \dots\dots\dots(2.1)$$

A : aktifitas lempung,

PI : indeks plastisitas,

C : prosentase ukuran lempung < 0,002 mm.

Nilai A yang besar menunjukkan bahwa tanah tersebut merupakan tanah lempung aktif (*active clay*), dan sebaliknya merupakan tanah lempung ts-aktif (*inactive clay*). Karena kadar lempung pada tanah ekspansif berbeda pada setiap daerah, menyebabkan pengembangan yang terjadi berbeda dan menyebabkan tanah bergelombang. Tekanan pengembangan yang dihasilkan ketika lempung mengembang dapat menyebabkan bangunan di atasnya terangkat. Pengembangan tanah menyebabkan kerusakan pada perkerasan jalan maupun bangunan ringan. Deformasi akibat pengembangan tanah pada umumnya sulit untuk diprediksi.

Seperti yang telah diketahui bahwa tanah ekspansif merupakan tanah yang mengandung ukuran butir tanah < 0,002 mm. Sifat-sifat ukuran butir halus tanah sangat dipengaruhi oleh komposisi yang terkandung didalamnya. Nelson dan Miller (1991) dalam Hardiyatmo (2017) membagi susunan kelompok mineral lempung menjadi tiga seperti dibawah ini.

- a. Kelompok mineral lempung tidak ekspansif. Mineral lempung ini tidak ekspansif karena mengandung ikatan hidrogen kuat sehingga menjaga setiap partikel lempung. *Kaolinite* termasuk dalam kelompok ini. *Kaolinite* merupakan mineral dari kelompok kaolin, susunan terdiri dari satu lembar silika

tetrahedral dan satu lembar aluminium tetrahedral dan satu lembar aluminium oktahedra, dengan satuan susunan setebal 7,2 unit Angstrom. Kaolinite mempunyai ikatan yang lebih stabil sehingga dapat mencegah air masuk diantara lembaran tanah, sehingga tidak mengembang.

- b. Kelompok 'seperti mika' (*mika-like*), misalnya *illite* dan *vermiculite*, yang bisa ekspansif, tapi umumnya tidak menyebabkan masalah. Illite memiliki ikatan potassium yang lemah dan memiliki kemampuan mengembang relatif rendah. Illite adalah suatu bentuk mineral lempung yang terdiri dari mineral-mineral kelompok illite. Illite mengandung ikatan potassium lemah, sehingga terdapat kemungkinan terjadi pengembangan.
- c. Kelompok smectite, didalamnya termasuk *montmorillonite*, yang sangat mudah mengembang atau ekspansif. Mineral ini sangat mudah mengembang dan dapat menyebabkan banyak masalah.

2.2.2 Sistem pelat dengan perkuatan tiang

Pertambahan lapisan air menyebabkan lapisan tanah lempung mengembang. Kembang susut tanah lempung menyebabkan kerusakan perkerasan di atasnya. Mengatasi masalah ini, banyak cara yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, salah satunya ialah menggunakan tiang-tiang kecil sebagai pengaku pelat. Sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Hardiyatmo (2008). Sistem ini menganggap bahwa pelat dan tiang menjadi satu-kesatuan. Puri (2015) dalam Diana dkk., (2016) menyatakan bahwa penggunaan tiang meningkatkan modulus reaksi tanah dasar. Pelat dan tiang dibuat monolit sehingga terdapat interaksi antara tanah, pelat, dan tiang dalam menahan beban yang bekerja.

Sistem pelat dengan perkuatan tiang bukan termasuk kedalam metode perbaikan tanah, melainkan sebagai salah satu alternatif perkuatan untuk menunjang perkerasan kaku. Tiang-tiang yang digunakan berfungsi sebagai pengaku pelat sehingga pelat tidak mudah mengalami lendutan dan beban yang diterima dapat menyebar secara merata.

2.2.3 Analisa Lendutan dengan Metode BoEF.

Metode *Beam on Elastic Foundation* pertama kali diperkenalkan oleh Hetenyi pada tahun 1974. Teori ini didasarkan pada asumsi jika lendutan yang terjadi sebanding dengan gaya yang terjadi, asumsi ini pertama kali diperkenalkan oleh Winkler pada tahun 1886. Analisa numeris ini dapat digunakan untuk analisa hubungan antar balok, pelat, bangunan, jembatan, pondasi, dll. Akan tetapi, ketika teori ini diterapkan pada pondasi tanah, hanya didasarkan pada teori praktis. Hal ini dikarenakan sifat fisis tanah terlalu kompleks untuk dijabarkan oleh persamaan matematis yang sebelumnya diperkenalkan Winkler. Namun, ada beberapa hal yang dapat digunakan untuk mendukung asumsi ini. Seperti sifat elastisitas tanah dan juga asumsi bahwa lendutan hanya terjadi pada bagian bawah beban. Menurut hetenyi, sifat-sifat ini dapat dijadikan untuk menyederhanakan sifat pondasi yang berada di tanah.

Teori BoEF didasarkan pada asumsi bahwa balok didukung oleh media yang bersifat elastis dan diberi gaya vertikal. Karena gaya ini, balok mengalami lendutan, kemudian gaya ini diteruskan ke bagian dasar balok. Lendutan bersifat positif dan diasumsikan balok mengalami tekanan dan tanah sebagai media penahan memberikan gaya ke atas. Ketika lendutan terjadi ke atas, maka tanah diasumsikan menahan gaya angkat tersebut. Lendutan yang terjadi sebanding dengan tekanan yang diberikan, persamaan ini ditunjukkan oleh Persamaan 2.2.

$$p = ky \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan,

p = tekanan (lbs/in²),

k = modulus reaksi tanah dasar (lbs/in²),

y = lendutan (in).

Asumsi didasarkan pada kemampuan tanah menerima gaya tarik dan tekan. Kemampuan tanah dalam menahan gaya ini menjadi salah satu sebab tanah diasumsikan mengikuti hukum Hooke. Kemudian, dengan asumsi bahwa b adalah lebar pelat, lendutan akan terjadi karena adanya gaya b_0k , atau dengan kata lain, tekanan dapat dijabarkan oleh persamaan 2.3.

$$p = bk_0y \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan,

k = modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (lbs/in³),

b = lebar (in),

k_0 = modulus reaksi tanah dasar (lbs/in³).

k disini telah dipengaruhi oleh panjang pelat dan akan sama dengan k_0 ketika panjang pelat yang digunakan sama.

Selama pelat yang dibebani mengalami lendutan, selain reaksi dalam arah vertikal, terdapat juga gaya dalam arah horizontal di sepanjang permukaan balok yang terhubung dengan pondasi. Beban dalam lbs/in. Gaya geser-angkat, Q , ke arah kiri diasumsikan bersifat positif. Gaya mengakibatkan momen, M , dengan gaya searah jarum jam dan bersifat positif. Persamaan gaya lintang/ geser yang terjadi ditunjukkan oleh Persamaan 2.4.

$$Q - (Q + dQ) + ky \cdot dx - q \cdot dx = 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan,

Q = gaya geser (lbs),

y = lendutan (in),

x = jarak beban ke titik tinjauan (in),

q = beban (lbs),

dengan,

$$\frac{dQ}{dx} = ky - q \dots\dots\dots(2.5)$$

Q = gaya geser (lbs),

y = lendutan (in),

x = jarak beban ke titik tinjauan (in),

q = beban (lbs).

Menggunakan hubungn $Q = dM/dx$, maka didapat Persamaan 2.6

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} = ky - q \dots\dots\dots(2.6)$$

Q = gaya geser (lbs),

M = momen (lbs.in),

y = lendutan (in),

x = jarak beban ke titik tinjauan (in),

q = beban (lbs),

dengan asumsi bahwa $EI(d^2y/dx) = -M$, maka didapat Persamaan 2.7

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = \frac{d^2M}{dx^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

M = momen (lbs.in),

y = lendutan (in),

x = jarak beban ke titik tinjauan (in),

E = modulus elastisitas (MPa),

I = momen inersia (in⁴),

dengan memasukan Persamaan 2.7, maka didapatkan Persamaan 2.8.

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -ky + q \dots\dots\dots(2.8)$$

y = lendutan (in),

x = jarak beban ke titik tinjauan (in),

E = modulus elastisitas (MPa),

I = momen inersia (in⁴),

Q diasumsikan bernilai nol, sehingga diperoleh Persamaan 2.9.

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -ky \dots\dots\dots(2.9)$$

y = lendutan (in),

x = jarak beban ke titik tinjauan (in),

E = modulus elastisitas (MPa),

I = momen inersia (in⁴),

Dengan menggabungkan Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.9 dan mengganti $y=e^{mx}$, maka didapatkan Persamaan 2.10

$$y = A_1e^{m_1x} + A_2e^{m_2x} + A_3e^{m_3x} + A_4e^{m_4x} \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan,

A = luas pelat (in²),

M = momen (lbs.in),

e = modulus elastisitas (MPa),

y = lendutan (in),

dimana kekakuan ditunjukkan pada Persamaan 2.11,

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \dots\dots\dots(2.11)$$

E = modulus elastisitas (MPa),

I = momen inersia (in⁴),

k = factor kekakuan,

λ = kekakuan.

Menggunakan Persamaan 2.12 dan 2.13 untuk mengetahui nilai e

$$e^{i\lambda x} = \cos \lambda x + i \cdot \sin \lambda x \dots\dots\dots(2.12)$$

$$e^{-i\lambda x} = \cos \lambda x - i \cdot \sin \lambda x \dots\dots\dots(2.13)$$

Dengan menggunakan konstanta, maka didapatkan Persamaan 2.14

$$(A_1 + A_4) = C_1 \dots\dots\dots(2.14)$$

$$i(A_1 - A_4) = C_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

$$(A_2 + A_3) = C_3 \dots\dots\dots(2.16)$$

$$i(A_1 + A_4) = C_4 \dots\dots\dots(2.17)$$

Persamaan lendutan seperti ditunjukkan Persamaan 2.18.

$$y = e^{\lambda x}(C_1 \cdot \cos \lambda x + C_2 \cdot \sin \lambda x) + e^{-\lambda x}(C_3 \cdot \cos \lambda x + C_4 \cdot \sin \lambda x) \dots\dots\dots(2.18)$$

C_1, C_2, C_3, C_4 = konstanta integrase,

λ = karakteristik panjang,

e = modulus elastisitas bahan,

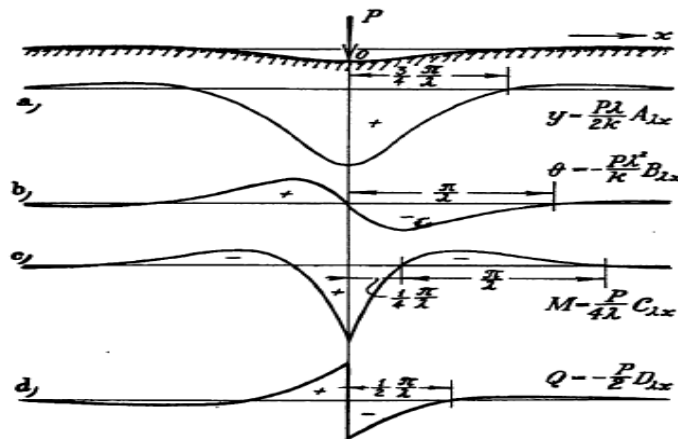
I = momen inersia.

Disini nilai λ sudah termasuk pengaruh nilai lentur balok dan elastisitas tanah sebagai dasar, dan ini merupakan faktor penting yang mempengaruhi bentuk garis elastis. Persamaan menunjukkan solusi umum untuk lendutan yang terjadi pada pondasi elastis dan subjek mengalami momen melintang. Terdapat tiga bentuk analisa metode *Beam on Elastic Foundation*, yaitu asumsi bahwa balok/ pelat bersifat tak terbatas (*infinite beam*), semi tidak terbatas (*semi-infinite*), dan terbatas (*finite beam*). Berikut akan dibahas tentang analisa balok dengan panjang terbatas dan tak terbatas.

a. *Infinite beam*

1. Beban di tengah bentang

Pada balok tak terhingga, beban diletakkan di tengah bentang sebesar P. Kondisi ini dapat diselesaikan dengan Persamaan 2.19. Dalam masalah ini, jarak dari beban ke ujung pelat diasumsikan tak terbatas dan nilai lendutan mendekati nol. Hasil ini didapatkan jika $e^{\lambda x}$ dianggap tidak ada dengan nilai lendutan di bawah beban menggunakan persamaan. Lendutan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.6a, nilai θ ditunjukkan oleh Gambar 2.6b, nilai momen terlihat pada Gambar 2.6c, dan gaya geser seperti terlihat pada Gambar 2.6d.



Gambar 2.6 Gaya yang terjadi akibat beban terpusat (a) lendutan, (b) θ , (c) momen, (d) gaya geser

$$y_0 = \frac{P\lambda}{2k} \dots\dots\dots(2.19)$$

2. Beban gabungan

Apabila sebuah balok tak terhingga dibebani dengan banyak beban titik, lendutan, kemiringan lendutan, momen, dan gaya geser yang terjadi berbeda tergantung letak dan jumlah beban. Lendutan pada sembarang titik dapat dicari dengan Persamaan 2.20

$$y = \frac{\lambda}{2k} \sum_{n=1}^n P_n A_{\lambda x_n} \dots\dots\dots(2.20)$$

dengan,

y = lendutan (in),

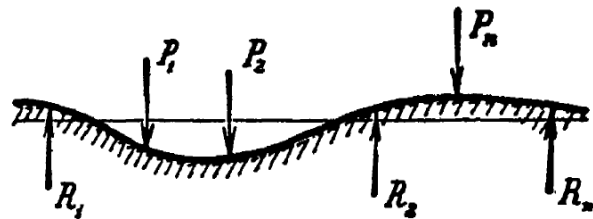
k = modulus reaksi tanah dasar (lbs/in³),

- A = luas pelat (in²),
 P = tekanan (lbs/in),
 λ = faktor kekakuan.

Dimana x merupakan jarak dari beban ke titik tinjauan. Dengan asumsi gaya yang bekerja bersifat positif dan negatif seperti pada gambar gaya angkat ke atas bersifat negatif seperti pada Gambar 2.7, maka lendutan didapatkan melalui Persamaan 2.21.

$$y = \frac{\lambda}{2k} \left(\sum_{n=1}^n P_n A \lambda x_n - \sum_{m=1}^n P_m A \lambda x_m \right) \dots \dots \dots (2.21)$$

- y = lendutan (in),
 k = modulus reaksi tanah dasar (lbs/in³),
 A = luas pelat (in²),
 P = tekanan (lbs/in),
 λ = faktor kekakuan.



Gambar 2.7 Gaya akibat gabungan beban.

R merupakan reaksi yang terjadi akibat gaya yang bekerja di atas balok. Analisa dapat dilakukan dengan asumsi bahwa lendutan yang terjadi pada titik R bernilai nol ($y = 0$) atau sebanding dengan nilai elastisitas. Nilai R ini dapat mempengaruhi lendutan yang terjadi karena dia merupakan gaya angkat ke atas. Ketika dasar dari pelat/ balok bersifat elastis, asumsi bahwa lendutan bernilai nol tidak dapat digunakan dan nilai lendutan didapat dengan asumsi bahwa $y_i = R_i/\Delta_i$. Asumsi ini dapat digunakan pada kombinasi beban yang lain.

b. *Finite beam*

Analisa lendutan yang terjadi pada balok di atas pondasi elastis didasarkan pada asumsi bahwa reaksi yang terjadi pada tanah sebanding

dengan lendutan yang terjadi pada balok pada titik yang ditinjau. Secara umum, lendutan yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan 2.22.

$$y = \frac{P\lambda}{k} \frac{1}{\sinh^2 \lambda I - \sin^2 \lambda I} \left\{ \begin{array}{l} 2 \cosh \lambda x \cdot \cos \lambda x \begin{pmatrix} \sinh \lambda I \cdot \cos \lambda a \cdot \cosh \lambda h \\ -\sin \lambda I \cdot \cosh \lambda a \cdot \cos \lambda b \end{pmatrix} \\ (\cosh \lambda x \cdot \sin \lambda x + \sinh \lambda x \cdot \cos \lambda x) \\ \left[\begin{array}{l} \sinh \lambda I \cdot (\sin \lambda a \cdot \cosh \lambda b - \cos \lambda a \cdot \sin \lambda b) + \\ \sin \lambda I \cdot (\sinh \lambda a \cdot \cos \lambda b - \cosh \lambda a \cdot \sin \lambda b) \end{array} \right] \end{array} \right\} \dots\dots(2.22)$$

dengan,

y = lendutan (m),

P = beban titik (kN),

I = panjang balok (m),

B = lebar balok (m),

I = momen inersia (m⁴),

λ = faktor kekakuan.

Sedangkan nilai momen yang terjadi ditunjukkan oleh Persamaan 2.23.

$$M = \frac{P}{2\lambda} \frac{1}{\sinh^2 \lambda I - \sin^2 \lambda I} \left\{ \begin{array}{l} 2 \sinh \lambda x \cdot \sin \lambda x \begin{pmatrix} \sinh \lambda I \cdot \cos \lambda a \cdot \cosh \lambda h \\ -\sin \lambda I \cdot \cosh \lambda a \cdot \cos \lambda b \end{pmatrix} \\ (\cosh \lambda x \cdot \sin \lambda x - \sinh \lambda x \cdot \cos \lambda x) \\ \left[\begin{array}{l} \sinh \lambda I \cdot (\sin \lambda a \cdot \cosh \lambda b - \cos \lambda a \cdot \sinh \lambda b) + \\ \sin \lambda I \cdot (\sinh \lambda a \cdot \cos \lambda b - \cosh \lambda a \cdot \sin \lambda b) \end{array} \right] \end{array} \right\} \dots\dots(2.23)$$

dengan,

M =momen (kN.m),

P = beban titik (kN),

I = panjang balok (m),

B = lebar balok (m),

I = momen inersia (m⁴),

λ = faktor kekakuan,

Dan gaya lintang yang terjadi ditunjukkan oleh Persamaan 2.24.

$$Q = P \frac{1}{\sinh^2 \lambda I - \sin^2 \lambda I} \left\{ \begin{array}{l} \cosh \lambda x \cdot \sin \lambda x + \sinh \lambda x \cdot \cos \lambda x \\ (\sin \lambda I \cdot \cos \lambda a \cdot \cos \lambda b - \sin \lambda I \cdot \cosh \lambda a \cdot \cos \lambda b + \\ \sin \lambda x \cdot \sin \lambda x) \\ \left[\begin{array}{l} \sinh \lambda I \cdot (\sin \lambda a \cdot \cosh \lambda b - \cos \lambda a \cdot \sinh \lambda b) + \\ \sin \lambda I \cdot (\sinh \lambda a \cdot \cos \lambda b - \cosh \lambda a \cdot \sin \lambda b) \end{array} \right] \end{array} \right\} \dots\dots(2.24)$$

dengan,

- Q = gaya geser (kN),
 P = beban titik (kN),
 I = panjang balok (m),
 B = lebar balok (m),
 I = momen inersia (m⁴),
 λ = faktor kekakuan,

$$\text{dengan } \lambda = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}} \dots\dots\dots(2.25)$$

- k = modulus reaksi tanah dasar (kN/in³),
 P = beban titik (kN),
 I = panjang balok (m),
 B = lebar balok (m),
 E = modulus elastisitas (kPa),
 I = momen inersia (m⁴).

Nilai x yang digunakan pada persamaan-persamaan tersebut, diukur dari ujung kiri ke titik tinjauan. Apabila besar x kurang dari a , maka digunakan persamaan-persamaan tersebut, dan x diukur dari titik C. Sedangkan jika nilai x lebih besar dari a , maka nilai a diganti b , dan jarak x diukur dari titik D.

a. Beban titik di pusat pelat

Balok dengan panjang terbatas dibebani di pusat bentang. Besarnya lendutan, momen, dan gaya lintang di sembarang titik dan di pusat bentang dapat dianalisa dengan asumsi ini. nilai lendutan pada sembarang titik dapat dilihat pada Persamaan 2.26.

$$y = \frac{P\lambda}{k} \frac{1}{\sinh^2 \lambda I - \sin^2 \lambda I} \left\{ \begin{array}{l} \cosh \lambda x \cdot \cos \lambda(1-x) + (\cos \lambda x \cdot \cosh \lambda(1-x) + \\ \sinh \lambda x \cdot \cos \lambda(1-x) + \sin \lambda x \cdot \sinh \lambda(1-x) + \\ 2 \cosh \lambda x \cdot \cos \lambda x \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2.26)$$

dengan,

- y = lendutan (m),
 P = beban titik (kN),
 I = panjang balok (m),
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m),
 I = momen inersia (m⁴),

λ = faktor kekakuan.

Sedangkan lendutan pada tengah bentang didapatkan melalui Persamaan 2.27.

$$y = \frac{P\lambda}{2} \frac{\cosh^2 \lambda I + \cos^2 \lambda I + 2}{\sinh^2 \lambda I + \sin^2 \lambda I} \dots\dots\dots(2.27)$$

dengan,

y = lendutan (m),

P = beban titik (kN),

I = panjang balok (m),

I = momen inersia (m⁴),

x = jarak beban ke titik tinjauan (m),

λ = faktor kekakuan.

Untuk nilai momen pada sembarang titik dapat dicari dengan Persamaan 2.28.

$$M_c = \frac{P}{4\lambda} \frac{1}{\sinh \lambda I - \sin \lambda I} \left\{ \begin{array}{l} \sinh \lambda x [\sin \lambda x - \sin \lambda(1-x)] \\ -\cos \lambda x [\cos \lambda x + \cos \lambda(1-x)] \\ +\sin \lambda x [\sinh \lambda x - \sinh \lambda(1-x)] \\ +\cos \lambda x [\cosh \lambda x + \cos \lambda(1-x)] \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2.28)$$

dengan,

M =momen (kN.m),

P = beban titik (kN),

I = panjang balok (m),

I = momen inersia (m⁴),

x = jarak beban ke titik tinjauan (m),

λ = faktor kekakuan,

dan pada momen di tengah bentang didapat dengan Persamaan 2.29.

$$M_c = \frac{P}{4\lambda} \frac{\cosh \lambda I - \cos \lambda I + 2}{\sinh \lambda I + \sin \lambda I} \dots\dots\dots(2.29)$$

dengan,

M =momen (kN.m),

P = beban titik (kN),

I = momen inersia (m⁴),

- λ = faktor kekakuan,
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m).

Sementara gaya lintang di sembarang titik didapat dengan Persamaan 2.30.

$$Q = \frac{P}{2} \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \left\{ \begin{array}{l} \cosh \lambda x [\sin \lambda x - \sin \lambda(l-x)] \\ + \cos \lambda x [\sinh \lambda x - \sinh \lambda(l-x)] \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2.30)$$

- Q = gaya lintang (kN),
 P = beban titik (kN),
 I = momen inersia (m⁴),
 λ = faktor kekakuan,
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m).

b. Beban titik di tepi pelat

Lendutan yang terjadi pada balok dengan panjang terbatas dibebani di salah satu ujung balok, dari asumsi tersebut, lendutan di sembarang titik didapatkan dengan Persamaan 2.31.

$$y = \frac{2P\lambda}{k} \frac{\sinh \lambda l \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \lambda x' - \sin \lambda l \cdot \cosh \lambda x \cdot \cos \lambda x'}{\sinh^2 \lambda l - \sin^2 \lambda l} \dots\dots\dots(2.31)$$

dengan,

- y = lendutan (m),
 P = beban titik (kN),
 l = panjang balok (m),
 I = momen inersia (m⁴),
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m),
 λ = faktor kekakuan,
 k = modulus reaksi tanah dasar (kN/m³).

Kemudian untuk lendutan pada tepi pelat dapat dianalisa dengan Persamaan 2.32 dan Persamaan 2.33.

$$y_A = \frac{2P\lambda}{k} \frac{\sinh \lambda l \cdot \cos \lambda x - \sin \lambda l \cdot \cosh \lambda x}{\sinh^2 \lambda l - \sin^2 \lambda l} \dots\dots\dots(2.32)$$

dengan,

- y = lendutan (m),
 P = beban titik (kN),

- I = panjang balok (m),
 I = momen inersia (m⁴),
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m),
 λ = faktor kekakuan,
 k = modulus reaksi tanah dasar (kN/m³),

$$y_B = \frac{2P\lambda}{k} \frac{\sinh \lambda l \cdot \cosh \lambda x - \sin \lambda l \cdot \cosh \lambda x}{\sinh^2 \lambda l - \sin^2 \lambda l} \dots\dots\dots(2.33)$$

dengan,

- y = lendutan (m),
 P = beban titik (kN),
 I = panjang balok (m),
 I = momen inersia (m⁴),
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m),
 λ = faktor kekakuan,
 k = modulus reaksi tanah dasar (kN/m³).

Untuk momen di sembarang titik didapatkan dengan Persamaan 2.34.

$$M = \frac{P}{\lambda} \frac{\sinh \lambda l \cdot \sin \lambda x \cdot \sinh \lambda x' - \sin \lambda l \cdot \sinh \lambda x \cdot \sin \lambda x'}{\sinh^2 \lambda l - \sin^2 \lambda l} \dots\dots\dots(2.34)$$

dengan,

- M =momen (kN.m),
 P = beban titik (kN),
 I = momen inersia (m⁴),
 λ = faktor kekakuan,
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m),

dan untuk gaya lintang dapat dianalisa dengan Persamaan 2.35.

$$Q = -P \frac{1}{\sinh^2 \lambda l + \sin^2 \lambda l} \left\{ \begin{array}{l} \sinh \lambda x [\csc \lambda x \cdot \sinh \lambda x - \sin \lambda x \cdot \cosh \lambda x'] \\ - \sin \lambda x [\cosh \lambda x \cdot \sin \lambda x' - \sinh \lambda x \cdot \cos \lambda x'] \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2.35)$$

dengan,

- Q = gaya lintang (kN),
 P = beban titik (kN),
 I = momen inersia (m⁴),

- λ = faktor kekakuan,
 x = jarak beban ke titik tinjauan (m).

2.2.4 Modulus reaksi tanah dasar

Modulus reaksi tanah dasar diperlukan dalam analisa perancangan perkerasan beton dengan perkuatan tiang (menggunakan system pelat terpaku). Modulus reaksi tanah dasar merupakan hubungan antara tekanan per meter (Hardiyatmo, 2017). Modulus reaksi tanah dasar dianalisa dengan Persamaan 2.36

$$k = \frac{P}{y} \dots\dots\dots(2.36)$$

dengan,

- P = beban per satuan luas pada pelat (kN/m²),
 y = lendutan atau penurunan rata-rata (m),
 k = modulus reaksi tanah dasar (kN/m³).

Modulus reaksi tanah dasar dapat dianalisa dengan dilakukan uji beban pelat (*plate loading test*) pada permukaan tanah dasar. AASHTO T-222 menyarankan penentuan nilai k didasarkan pada beban = 10 psi = 69 kn/m² yang menyebabkan lendutan tertentu, sehingga modulus reaksi tanah dasar menurut AASHTO ditunjukkan oleh Persamaan 2.37

$$k = \frac{69}{y} \quad (\text{kN/m}^3) \dots\dots\dots(2.37)$$

dengan,

- y = lendutan atau penurunan rata-rata (m),
 k = modulus reaksi tanah dasar (kN/m³).

Modulus reaksi tanah dasar akibat penambahan tiang/ modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k') merupakan modulus reaksi tanah dasar yang dipengaruhi tiang-tiang, sehingga didapatkan Persamaan 2.38

$$k' = k + \Delta k \dots\dots\dots(2.38)$$

dengan,

- k' = modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (kN/m³),
 k = modulus reaksi tanah dasar (kN/m³),

Δk = kenaikan modulus reaksi tanah dasar akibat penambahan tiang (kN/m^3).

2.2.5 Parameter pengujian

a. Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas tanah adalah salah satu parameter tanah untuk menentukan penurunan tanah (Naeini & Moayed, 2014). Seperti halnya k_v , E_s dapat diperoleh dari hasil uji lapangan dan laboratorium, persamaan empiris, dan nilai tabulasi. Bowles (dalam Naeini & Moayed, 2014) mengusulkan korelasi empiris untuk mendapatkan nilai E_s dari data *shear strength* (s_u) dan *cone penetration test*. Hubungan antara E_s dan s_u untuk tanah terkonsolidasi normal ditunjukkan pada Persamaan 2.39:

$$E_s = 200 \times s_u \dots\dots\dots(2.39)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas tanah (MPa),

s_u = gaya geser (kN).

Bowles (1996) dalam Naeini & Moayed (2014) memberikan persamaan lain untuk mendapatkan nilai E_s dengan menggunakan hubungan nilai penetrasi standar. Nilai E_s tergantung kepada jenis tanah. Tanah berpasir dapat dicari dengan Persamaan 2.40

$$E_s = 0,32N + 4,8 \dots\dots\dots (2.40)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas tanah (MPa),

N = uji SPT.

Untuk tanah berbutir halus ditunjukkan Persamaan 2.41

$$E_s = 0,3N + 1,8 \dots\dots\dots (2.41)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas tanah (MPa),

N = uji SPT.

Webb (1969) dalam Naeini & Moayed (2014) memberikan korelasi untuk mendapat nilai modulus elastisitas tanah. Persamaan dibagi untuk jenis tanah pasir dan pasir berlempung. Tanah berpasir ditunjukkan pada Persamaan 2.42, sedangkan untuk tanah pasir berlempung ditunjukkan pada Persamaan 2.43.

$$E_s = 0,5N + 7,5 \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas tanah (MPa),

N = uji SPT,

$$E_s = 0,33N + 1,66 \quad \dots\dots\dots 2.43)$$

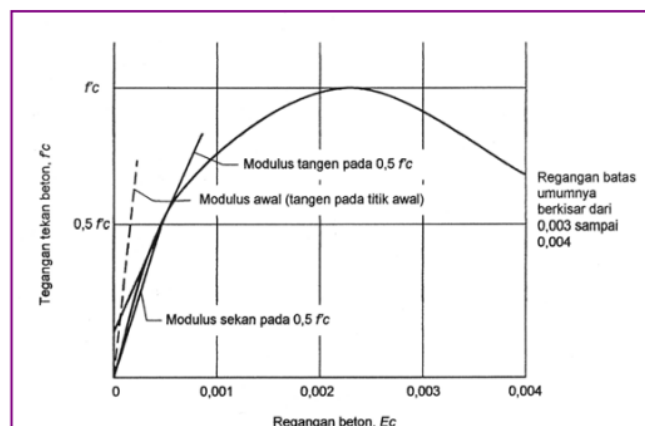
dengan,

E_s = modulus elastisitas tanah (MPa),

N = uji SPT .

b. Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas adalah rasio dari tegangan normal tarik atau tekan terhadap regangan (Rompas dkk., 2015). Nilai modulus elastisitas beton merupakan nilai kekuatan beton yang diberi gaya tegak lurus serat beton (Suarnita, 2011). Beban yang diberikan menghasilkan kurva hubungan regangan dan tegangan yang merupakan fungsi dari waktu pembebanan. Hubungan linear dihasilkan dari beban yang diberikan secara singkat. Kurva hubungan tegangan dan regangan disajikan Wang (2001) dalam Suarnita (2011) seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kurva hubungan tegangan dengan regangan

Kemiringan garis singgung di segmen pertama garis parabola menunjukkan nilai modulus tangen atau modulus elastisitas beton. Modulus elastisitas diambil dari garis yang melewati nilai $0,5f_c$. sesuai SK SNI T-15-03, nilai modulus elastisitas beton dapat dicari dengan Persamaan 2.44 berikut :

$$E_c = 0,043 \times W_c^{1,5} \times \sqrt{f_c} \dots\dots\dots(2.44)$$

dengan,

E_c = modulus elastisitas beton (kg/cm^2),

W_c = berat isi beton kering oven (kg/cm^3),

f_c = kuat tekan beton (kg/cm^2).

Berdasarkan metode *conjugated beams* diperoleh Persamaan 2.45 sebagai berikut:

$$E = \frac{Qa}{24\delta l} (3l^2 - a^2) \dots\dots\dots(2.45)$$

dengan,

E = modulus elastisitas (kN/m^2),

Q = beban (kN),

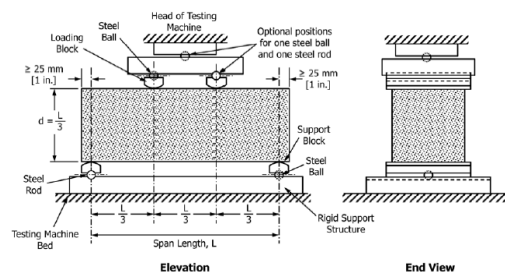
l = panjang pelat (m),

I = momen inersia penampang (m^4),

δ = lendutan balok (m),

a = jarak dari titik beban ke tumpuan.

Skema pengujian modulus lentur beton metode *third point load* berdasarkan ASTM No C78/C78M-15a ditunjukkan Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Skema pengujian modulus lentur beton metode *third point load*.