

BAB II

STUDI PUSTAKA

II.1 Tanah

Tanah merupakan material yang terdiri dari butiran mineral padat yang tidak terikat (secara kimia) satu sama lain dan dari bahan organik yang mengalami pelapukan (yang memiliki partikel padat) disertai cairan dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di dalam partikel padat tersebut (Das, 2010).

Partikel-partikel yang terdapat pada tanah memiliki ukuran yang bervariasi yang berfungsi sebagai penyusun tanah. Berdasarkan ukuran partikel-partikel penyusun tanah yang paling dominan, tanah diklasifikasikan menjadi *clay* (lempung), *sand* (pasir), *gravel* (kerikil), *silt* (lanau) dan tanah digolongkan sebagai kerikil bila ukuran butir lebih dari 2 mm, pasir bila ukuran butir antara 2 sampai 0,06 mm, lanau bila ukuran butir antar 0,06 mm sampai 0,002 dan lempung bila ukuran butir lebih besar dari 0,002 mm.

II.2 Penyelidikan Tanah

Proses dalam pengambilan *sample* tanah adalah untuk mengetahui kondisi tanah dan sifat yang sebenarnya adalah kegiatan dalam penyelidikan tanah. Oleh karena itu penyelidikan tanah merupakan pekerjaan yang pertama harus dilakukan agar dapat mengetahui parameter tanah yang digunakan dalam perhitungan kapasitas dukung lateral. Tujuan penyelidikan tanah adalah sebagai berikut

1. Mendapatkan contoh tanah asli (*undisturbed*) dan tidak asli (*disturbed*) untuk diidentifikasi tanah tersebut secara visual dan untuk keperluan pengujian pada laboratorium
2. Mengetahui kondisi alamiah tanah yang terkait dengan perencanaan struktur yang akan dibangun di atasnya.
3. Menentukan kapasitas dukung tanah menurut tipe pondasi yang akan digunakan.
4. Menentukan kedalaman dan tipe pondasi.
5. Mengetahui tinggi muka air tanah (MAT)

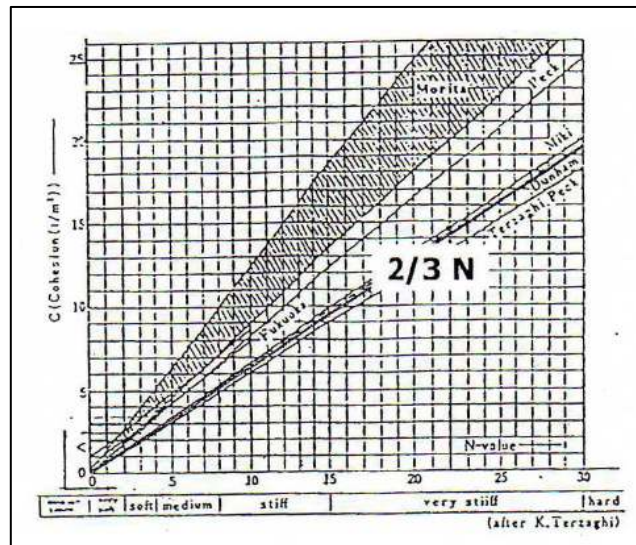
II.3 Parameter Tanah

Dalam suatu tanah pada umumnya terdiri dari beberapa lapisan yang masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda. Karakteristik inilah yang mempengaruhi beberapa parameter tanah yang menggambarkan keadaan kondisi tanah pada lokasi. Parameter yang di gunakan dalam desain adalah : berat isi tanah (γ), sudut geser (ϕ), kohesi (c), *poisson's ratio* (ν), *modulus young* (E), sudut dilatasi (ψ), *void ratio* (e) dan permeabilitas (k). Penentuan nilai parameter tanah akan diambil dari pada korelasi dengan N-SPT dan dari Hasil Uji Laboratorium.

a. Undrained Shear Strength (c_u)

Undrained Shear Strength (c_u) merupakan parameter kuat geser tanah berupa kohesi pada kondisi *undrained*. Pada penelitian ini, metode yang digunakan untuk menentukan nilai c_u adalah korelasi secara empiris dengan menggunakan persamaan dari Terzaghi (1943) yaitu:

$$c_u = \frac{20}{3} \times N \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$



Gambar II.1 Korelasi N-SPT dengan c_u (Terzaghi, 1943)

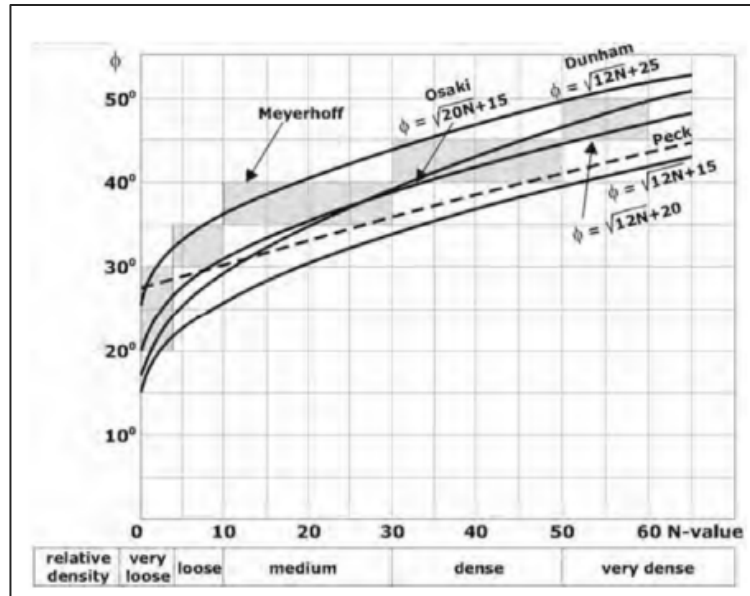
Tabel II.1 Pendekatan nilai C_u berdasarkan konsistensi (Terzaghi and Peck, 1967)

Consistency	N	C_u (kN/m^2)
Very Soft	0-2	<12
Soft	2-4	12-25
Medium	4-8	25-50
Stiff	8-15	50-100
Very Stiff	15-30	100-200
Hard	>30	>200

b. Sudut Geser (ϕ)

Pada tanah pasir, kohesi (c) dianggap sama dengan nol ($c = 0$). Sedangkan nilai sudut geser dalam untuk tanah pasir didapatkan melalui korelasi empiris Terzaghi dan Peck (1967) dengan persamaan berikut.

$$\phi = \sqrt{12(N - SPT) + 20}$$



Gambar II.2 Korelasi N-SPT dengan Sudut Geser (Terzaghi & Peck, 1967)

c. Berat Jenis Tanah (γ)

Berat jenis tanah merupakan perbandingan antara berat tanah kering dengan volume tanah termasuk volume pori-pori tanah. Berat jenis tanah bisa didapatkan dengan korelasi nilai N-SPT.

Table 6-1 Standard penetration test (SPT) correlations					
Strength correlations will be given in later chapters as needed. Values shown are primarily for "order of magnitude."					
<i>Cohesionless Soil</i>					
N	0-10	11-30	31-50	> 50	
Unit weight γ , kN/m ³	12-16	14-18	16-20	18-23	
Angle of friction ϕ	25-32	28-36	30-40	> 35	
State	Loose	Medium	Dense	Very dense	
Relative density D_r	see Eq. (6-3) and Eq. (6-4) since depends on $p_o = \gamma y$				
<i>Cohesive Soil</i>					
N	< 4	4-6	6-15	16-25	> 25
Unit weight [†] γ , kN/m ³	14-18	16-18	16-18	16-20	> 20
q_u , kPa [†]	< 25	20-50	30-60	40-200	> 100
Consistency	Very soft	Soft	Medium	Stiff	Hard

[†] Values heavily dependent on water content.

Gambar II.3 Korelasi Berat Jenis untuk Non Kohesif dan Kohesif (Bowles)

d. Modulus *Young*/Elastisitas Tanah (E)

Nilai dari modulus elastisitas menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah. Nilai modulus elastisitas ini bisa didapatkan dari pengujian Triaxial dan korelasi empiris dengan N-SPT. Nilai Modulus Elastisitas (E) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dan data N-SPT.

Tabel II.2 Korelasi N-SPT dengan E (Coduto, 2001)

Jenis Tanah	E (kN/m ²)
Pasir NC	500 (N + 15)
	15000 sampai 22000) In N
Pasir OC	1800 + 750 N
Pasir Jenuh	200 (N+15)
Pasir Berkeril dan Keril	1200 (N+6)
	600 (N+6) ; N ≤ 15
	600 (N+15 + 2000 ; N > 15
Pasir Berlempung	320 (N+15)
	320 (N+15)
Lempung Lunak	-
Lempung Keras	300 (N+6)

Berikut merupakan pendekatan nilai modulus elastisitas tanah menurut *Hand Book of Geotechnical Investigation and Design Tables* (2007).

Tabel II.3 Pendekatan Nilai Modulus Elastisitas Tanah menurut (*Hand Book of Geotechnical Investigation and Design Tables*, 2007)

Type	Strength of soil	Elastic modulus, E (Mpa)	
		Short term	Long term
Gravel	Loose	25-50	
	Medium	50-100	
	Dense	100-200	
Medium to Coarse sand	Very Loose	<5	
	Loose	3-10	
	Medium dense	8-30	
	Dense	25-50	
Fine sand	Very dense	40-100	
	Loose	5-10	
	Medium	10-25	
Silt	Dense	25-50	
	Soft	<10	<8
	Stiff	10-20	8-15
Clay	Hard	>20	>15
	Very soft	<3	<2
	Soft	2-7	1-5
	Firm	5-12	4-8
	Stiff	10-25	7-20
	Very stiff	20-50	15-35
Hard	Hard	40-80	30-60

- e. Korelasi Jenis tanah dengan Poisson Ratio (ν')

Berikut ini merupakan nilai *poisson ratio* berdasarkan korelasi oleh Das (1999).

Tabel II.4 Korelasi N-SPT terhadap Poisson's Ratio (Das, 1999)

Tipe Tanah	Poisson's Ratio (ν')
Pasir Lepas (Loose sand)	0,2 – 0,4
Pasir Sedang (Medium Sand)	0,25 – 0,4
Pasir Padat (Dense Sand)	0,3 – 0,45
Pasir Berlanau (Silty Sand)	0,2 – 0,4
Lempung Lunak (Soft Clay)	0,15 – 0,25
Lempung Sedang (Medium Clay)	0,2 – 0,5

Pada tanah kondisi *drained* poisson ratio berkisar 0.3-0.4. Sedangkan pada tanah *undrained* bernilai 0.5, namun menurut Bowles (1986). pada kondisi *undrained* nilai poisson ratio yang disarankan memakai nilai $\nu = 0.495$.

- f. Koefisien Permeabilitas

Modulus Koefisien Permeabilitas (k) dibutuhkan untuk mengstimasi besarnya rembesan koefisien permeabilitas.

Tabel II.5 Korelasi Koefisien Permeabilitas (Das, 1999)

Jenis Tanah	k (cm/det)	Konsistensi
Kerikil	$> 10^{-1}$	High permeability
Kerikil halus/pasir	$10^{-1} - 10^{-3}$	Medium permeability
Pasir sangat halus Pasir lanau Lanau tidak padat	$10^{-3} - 10^{-5}$	Low permeability
Lanau padat Lanau lempung Lanau tidak murni	$10^{-5} - 10^{-7}$	Very low permeability
Lempung	$< 10^{-7}$	Impervious (rapat air)

II.4 Parameter Tanah Dinamik

Parameter tanah dinamik yang digunakan pada analisis ini adalah redaman atau damping ratio (D), kecepatan gelombang geser tanah (V_s), modulus geser tanah (G), dan dan regangan. Das (1993) dalam Pawirodikromo (2012) menyatakan nilai-nilai parameter tanah dapat dicari dengan berbagai macam cara misalnya dengan pengujian lapangan, pengujian laboratioum, dan hubungan empiris (korelasi) yang diperoleh dari hasil uji laboratorium dan uji lapangan. Berikut merupakan uraian mengenai parameter dinamik tanah.

a. Modulus Geser (G)

Modulus geser adalah hasil interpretasi antara tegangan geser (τ) dan regangan geser. Tegangan geser didapat dengan membagi gaya geser dengan luas geser. Regangan geser diperoleh dari derajat distorsi pada elemen tanah yang disebabkan oleh adanya gelombang geser akibat gempa atau dapat dinyatakan dengan perbandingan antara perpindahan mendatar dengan tinggi elemen.

Modulus geser maksimum (G_0) adalah modulus geser untuk regangan geser yang sangat kecil. Terdapat beberapa peneliti yang sudah melakukan studi tentang besarnya nilai modulus geser maksimum (G_0). Salah satunya adalah Imai & Yoshimura (1970). Berikut merupakan rumus dengan menggunakan nilai NSPT untuk mencari modulus geser maksimum.

$$G_{\max} = 10000 N^{0.78}$$

b. Damping (Redaman)

Damping adalah pengurangan getaran yang mempengaruhi energi pada struktur. Redaman menggambarkan jumlah energi yang berkurang ketika struktur bergetar. Dengan tingkat redaman yang tinggi banyak energi yang hilang sehingga getaran pada struktur berkurang. Semua struktur memiliki tingkat redaman yang melekat pada struktur tersebut. Penelitian Carson (1994), dari hasil uji lapangan menyatakan bahwa rata-rata rasio redaman lantai beton bertulang sekitar 2,2 % dan untuk lantai komposit 1%. Dalam analisis dinamik menggunakan program PLAXIS 2D dan 3D perlu adanya koefisien Rayleigh α dan β . Berikut merupakan rumus yang disarankan manual PLAXIS 2D dan 3D untuk menentukan koefisien Rayleigh α dan β .

- Rayleigh α :

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 \frac{\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

- Rayleigh β :

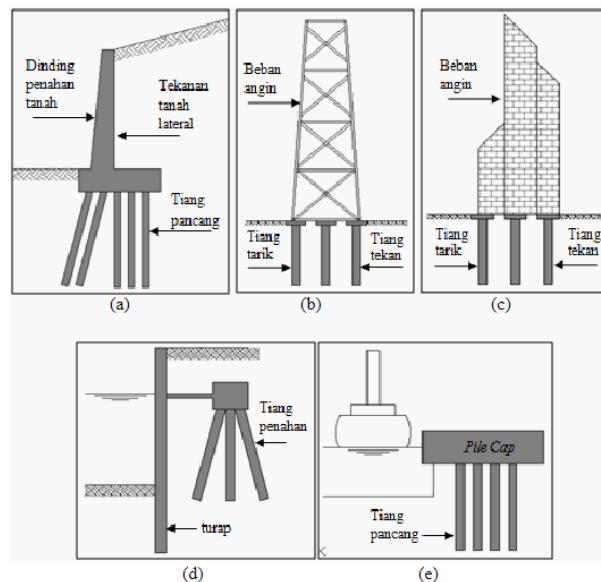
$$\beta = 2 \frac{\omega_1\xi_1 - \omega_2\xi_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

II.5 Kapasitas Dukung Lateral

Pondasi adalah bagian dari struktur bangunan yang berfungsi menopang dan meneruskan beban ke dalam tanah (*Joseph E. Bowles, 1997*). Pondasi terbagi

menjadi dua, yaitu; Pondasi dangkal (*Shallow Foundation*) dan Pondasi dalam (*Deep Foundation*). Pondasi dalam perencanaannya harus bisa menahan beban aksial dan beban lateral. Beban/gaya lateral adalah beban yang bekerja pada arah horizontal. Beban lateral disebabkan oleh tekanan tanah lateral, beban gempa, beban angin beban hempas ombak atau beban kapal yang bersandar pada sisi struktur bangunan, dan lain-lain.

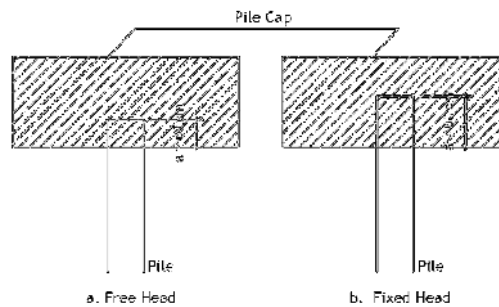
Pondasi tiang harus dapat menahan beban lateral akibat dari tekanan tanah lateral pada dinding penahan tanah seperti yang terlihat pada Gambar II.4(a). Pondasi tiang juga harus mampu menahan beban lateral seperti beban angin yang terjadi pada bangunan tingkat tinggi seperti gedung pencakar langit yang terlihat pada Gambar II.4(b) dan Gambar II.4(c). Pondasi tiang juga mampu menahan dinding turap yang menyangga pada pondasi tiang seperti Gambar II.4(d). Pondasi tiang mampu menanggung beban lateral yang diakibatkan gaya eksternal seperti hempasan ombak, angin, dan benturan kapal pada bangunan lepas pantai seperti Gambar II.4(e). Penggambaran pondasi tiang dalam menahan beban lateral dapat dilihat pada Gambar II.4.



Gambar II.4 Aplikasi Pondasi Tiang Menahan Beban Arah Lateral

Dalam analisis kapasitas dukung lateral pada pondasi tiang perlu dibedakan menurut model ikatannya dengan pelat penutup tiang. Pondasi tiang dibedakan menjadi dua tipe, yaitu tiang ujung terjepit (*fixed head*) dan tiang ujung bebas (*free*

head). Tiang *fixed head* adalah tiang yang ujung atasnya terjepit (tertanam) pada pelat penutup kepala tiang/*cap* sedalam 60 cm, seperti pada Gambar II.5(b). Tiang *free head* adalah tiang yang bagian atasnya tidak terjepit atau terjepit ke dalam pelat penutup/*cap* kepala tiang tetapi kurang dari 60 cm, ditunjukkan pada Gambar II.5(a). (McNulty, 1956). Definisi tiang ujung jepit dan ujung bebas dapat dilihat pada Gambar II.5.



Gambar II.5 Definisi Tiang Kepala Terjepit dan Bebas (Sumber : McNulty, 1956 dalam Hardiyatmo, 2015)

II.5.1 Kapasitas Dukung Lateral Izin

Kapasitas dukung lateral berdasarkan defleksi maksimum yang diizinkan defleksi pada bangunan Gedung adalah 6 mm, sedangkan untuk bangunan-bangunan yang lain sejenis Menara transmisi adalah 12 mm atau sedikit lebih besar (Sumber: McNulty, 1956 dalam Hardiyatmo, 2006). Menurut peraturan dinas P2B No. 50 Tahun 2007, bahwa defleksi izin maksimum pada tiang *fixed head* adalah sebesar 6 mm. Sedangkan menurut SNI 8460:2017 besar defleksi izin tiang adalah 12 mm dalam kondisi *free head*.

II.6 Metode Perhitungan Kapasitas Dukung Lateral

Pondasi tiang terbagi menjadi 2 klasifikasi, yaitu pondasi tiang pendek (kaku) dan pondasi tiang panjang (elastis). Langkah pertama yang perlu dilakukan untuk menghitung kapasitas lateral tiang adalah menentukan apakah tiang tersebut berperilaku sebagai tiang panjang atau tiang pendek untuk mengetahui metode apa yang digunakan. Menurut Tomlinson, 1977 kriteria tiang kaku/*rigid pile* (pendek) dan tiang tidak kaku/*elastic pile* (panjang) berdasarkan faktor kekakuan R dan T yang dikaitkan dengan panjang tiang yang tertanam dalam tanah (L) diperlihatkan pada tabel di bawah ini:

Tabel II.6 Kriteria Pondasi Tiang Pendek dan Tiang Panjang (Tomlinson, 1977)

Tipe Tiang	Modulus tanah (K) Bertambah dengan kedalaman	Modulus Tanah (K) konstan	Tipe Tiang
Kaku (Pendek)	$L \leq 2T$	$L \leq 2R$	Kaku (Pendek)
Tidak Kaku (Panjang)	$L \geq 4T$	$L \geq 3,5 R$	Tidak Kaku (Panjang)

Kriteria dalam menentukan tiang kaku (pendek) dan tiang tidak kaku (panjang) didasarkan kekakuan relatif antar pondasi tiang dengan tanah. Dalam hal ini digunakan faktor kekakuan R untuk menentukan tiang pendek atau panjang.

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{KD}}$$

Dimana:

$K = k_s/1.5$, dengan nilai k_s adalah modulus subgrade tanah yang dapat ditentukan dengan percobaan pembebanan plat di lapangan atau dari korelasi dengan kuat geser tanah seperti tabel berikut.

Tabel II.7 Hubungan antara k_1 dan c_u (Sumber: Paulus, 2006)

Konsistensi	Sedang hingga jenuh	Teguh hingga keras	Keras
Kuat geser undrained, c_u (kg/cm^3)	0.50 - 1.00	1.00 - 2.00	>2.00
Rentang k_1 (kg/cm^2)	0.15 - 0.30	0.30 - 0.60	> 0.60

Sedangkan tanah lempung *normally consolidated* dan tanah berbutir kasar, nilai modulus subgrade meningkat secara linier terhadap kedalaman, sehingga digunakan kriteria lain, yaitu.

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}$$

Dimana:

E = modulus kekakuan tiang

I = momen inersia tiang

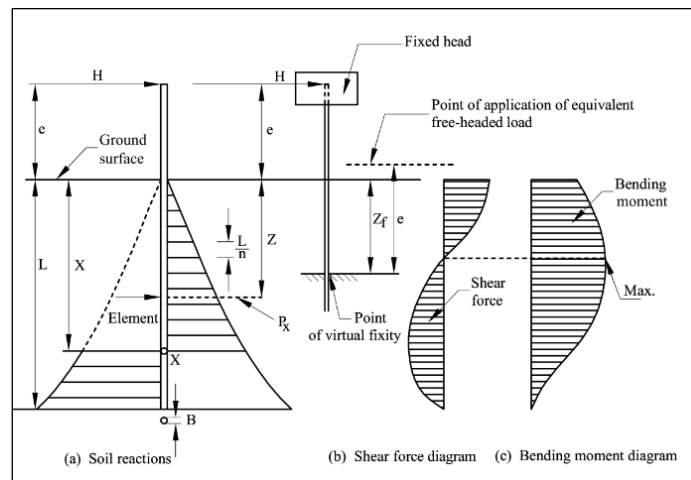
n_h = modulus variasi dari hubungan dengan K .

K adalah sebagai berikut:

$$K = \frac{n_h \cdot x}{D}$$

II.6.1 Metode Brinch Hansen

Metode Brinch Hansen merupakan metode untuk mengestimasi beban lateral pada pondasi tiang pancang pendek untuk tanah berlapis, baik granular maupun kohesif. Namun dalam menghitung lendutan pada pondasi tiang, metode ini tidak dapat digunakan. Metode Brinch Hansen digunakan untuk menentukan tahanan lateral tanah dengan koefisien tekanan tanah lateral K_q dan K_c , koefisien ini merupakan fungsi dari sudut geser tanah dan z/d , dimana jika sudut geser = 0 maka $K_q = 0$. Mekanisme tekanan tanah pada metode ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar II.6 Reaksi Tanah, Geser dan Momen Lentur pada Metode Brinch Hansen (Paulous, 1960)

Persamaan tahanan lateral:

$$P_u(z) = q(z)K_q(z) + c \cdot K_c(z)$$

$$q(z) = P + \gamma_{sat}(z)$$

$$\Sigma M = \Sigma P_u d \left(\frac{L}{n} \right) (e + z) - \Sigma P_u d \left(\frac{L}{n} \right) (e + z)$$

$$H_u(e + x) = \Sigma P_u d \left(\frac{L}{n} \right) (x - z) + \Sigma P_u d \left(\frac{L}{n} \right) (x - z)$$

Dimana:

z = titik suatu kedalaman (m)

γ_{sat} = berat volume basah (kN/m^3)

c = Kohesi (kPa)

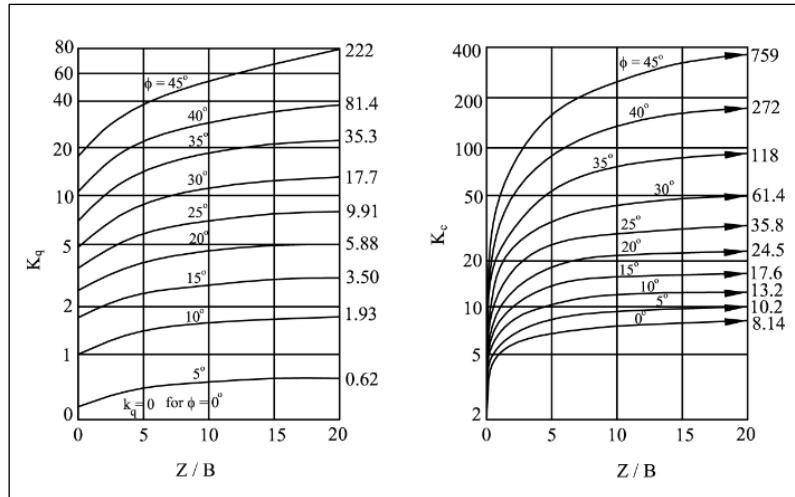
e = Eksentrisitas (m)

K_c, K_q = faktor yang merupakan fungsi ϕ (sudut geser) dan z/d

ΣM = momen, x adalah titik rotasi ditentukan dengan $\Sigma M = 0$

L/n = ketebalan elemen (m)

Berikut merupakan grafik hubungan K_c dan K_q terhadap nilai ϕ dan z/d .



Gambar II.7 Grafik Hubungan K_q dan K_c terhadap nilai ϕ dan z/d .

II.6.2 Metode Broms

Metode Broms adalah metode perhitungan manual untuk analisis kapasitas dukung lateral pondasi tiang tunggal. Metode ini menghitung ketahanan tanah ultimit terhadap beban lateral dan moment maksimum yang didistribusi sepanjang tiang. Metode Broms dapat digunakan untuk menghitung kapasitas dukung lateral pada kepala tiang terjepit (*fixed head*) dan kepala tiang bebas (*free head*) dengan kondisi tanah homogen/ lempung saja ($c=0$) dan pasir saja ($\phi=0$), tidak bisa digunakan pada kondisi tanah heterogen/berlapis. Tahapan-tahapan yang digunakan pada penelitian ini yaitu berdasarkan *U.S. Departement of Transportation* (1977) yang tersedia pada publikasi FHWA (1998) dan Buku *Principles of Foundation Engineering* edisi 8 oleh Braja M Das. Berikut merupakan tahapan perhitungan kapasitas dukung lateral dengan metode Broms.

1. Menentukan jenis tanah (tanah lempung atau tanah pasir).
2. Menentukan koefisien dari subgrade horizontal (K_h) pada tanah lempung atau tanah pasir).

a. Tanah lempung

$$K_h = \frac{n_1 n_2 80 q_u}{b}$$

Dimana:

q_u = Unconfined compressive strength (kN/m²)

b = Diameter pondasi (m)

n_1 dan n_2 = Koefisien dari Tabel II.8.

Tabel II.8 Koefisien n_1 dan n_2 untuk Tanah Lunak (Terzaghi, 1955)

<i>Unconfined Compressive Strength, q_u, (kPa)</i>	<i>n_1</i>
<i>Less than 48 kPa</i>	<i>0,32</i>
<i>48 to 191 kPa</i>	<i>0,36</i>
<i>More than 191 kPa</i>	<i>0,40</i>
<i>Pile Material</i>	<i>n_2</i>
<i>Steel</i>	<i>1,00</i>
<i>Concrete</i>	<i>1,15</i>
<i>Wood</i>	<i>1,30</i>

b. Tanah pasir

Nilai K_h tanah pasir bisa ditentukan dari Tabel II.9.

Tabel II.9 Koefisien inisial Modulus Subgrade, n_h (Terzaghi, 1955)

<i>Soil Density</i>	<i>n_h, (kN/m³)</i>	
	<i>Above Ground Water</i>	<i>Below Ground Water</i>
<i>Loose</i>	1900	1086
<i>Medium</i>	8143	5429
<i>Dense</i>	1744	10857

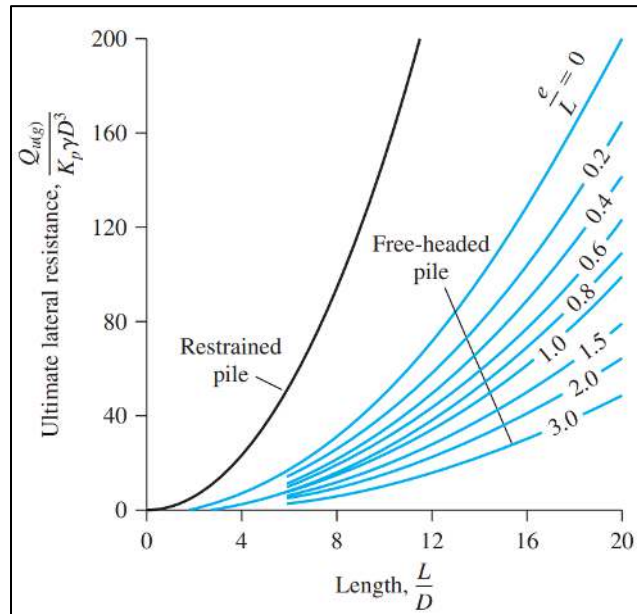
3. Menentukan parameter pondasi tiang.

- a. Modulus young (E)
- b. Momen inersia (I)
- c. *Section* Modulus (S)
- d. Kuat tarik (f_y) jika material baja dan kuat tekan (f_c) jika material beton.
- e. Panjang pondasi (L)
- f. Diameter pondasi (b)
- g. Menghitung resisting moment dari tiang (My)
 - $My = C_s f_y S$ (kNm) untuk tiang baja
 - $My = f'_c S$ (kN-m) untuk tiang beton

4. Menentukan β_h untuk tanah lempung dan n untuk tanah pasir.
 - $\beta_h = \sqrt[4]{K_h b / 4EI}$ untuk tanah lempung
 - $\eta = \sqrt[5]{K_h / EI}$ untuk tanah pasir
5. Menentukan faktor panjang tak berdimensi
 - $\beta_h L$ untuk tanah lempung
 - ηL untuk tanah pasir
6. Menentukan tiang panjang atau pendek
 - a. Tanah lempung
 - $\beta_h L > 2,25$ (panjang)
 - $\beta_h L < 2,25$ (pendek)
 - b. Tanah pasir
 - $\eta L > 4$ (panjang)
 - $\eta L < 4$ (pendek)
7. Menentukan parameter tanah yang dibutuhkan
 - a. Koefisien tekanan pasir rankine untuk tanah pasir, (K_p)

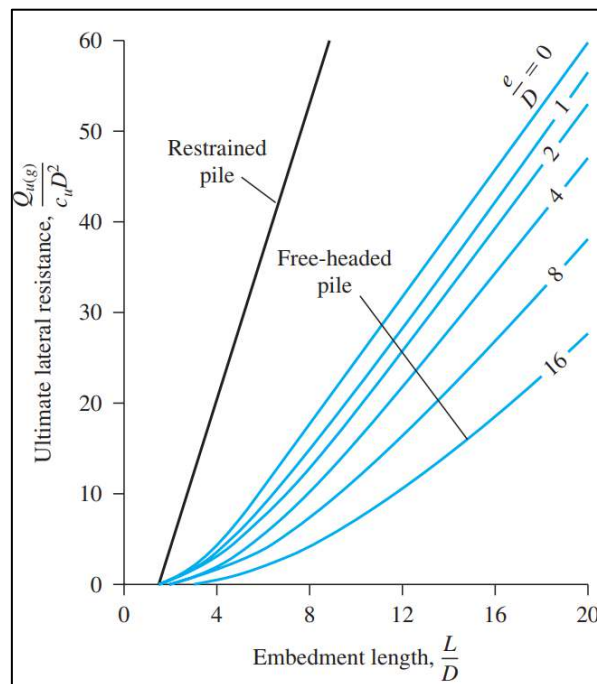
$$K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}), \text{ dimana } \phi = \text{sudut geser dalam.}$$
 - b. Berat jenis tanah, γ (kN/m^3)
 - c. Kohesi, C_u (kPa)

$$C_u = \frac{1}{2} q_u$$
8. Menghitung kapasitas dukung lateral pondasi tiang, Q_u .
 - a. Tiang pendek pada kondisi *free head* atau *fixed head* pada tanah lempung
 Menggunakan L/D (e_o/D untuk *free head*) pilih/tarik garis sesuai titik $Q_u/C_u \cdot D^2$, untuk mendapatkan Q_u (kN).



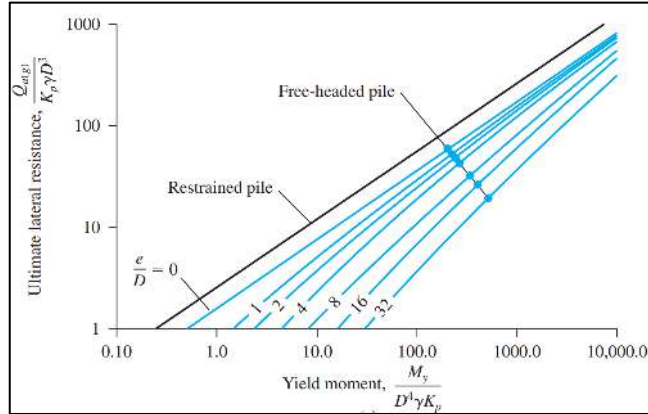
Gambar II.8 Tiang Pendek Pada Tanah Lempung (Das, 1999)

- b. Tiang panjang pada kondisi *free head* atau *fixed head* pada tanah lempung Menggunakan $M_y/C_u.D^3$ (e_0/D untuk *free head*) pilih/tarik garis sesuai titik $Q_u/C_u.D^2$, untuk mendapatkan Q_u (kN).



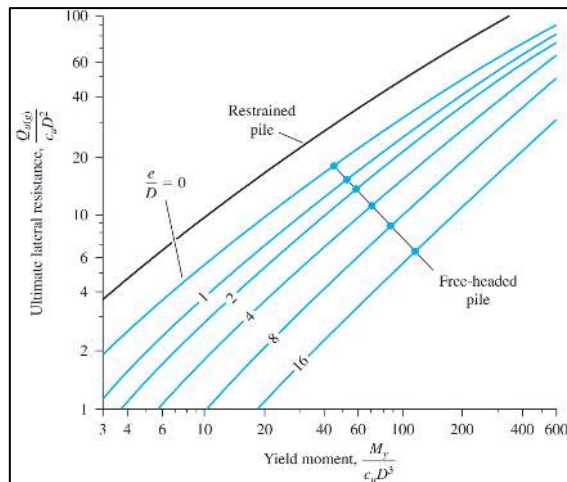
Gambar II.9 Tiang Panjang Pada Tanah Lempung (Das, 1999)

- c. Tiang pendek pada kondisi *free head* atau *fixed head* pada tanah pasir Menggunakan L/D (e_0/D untuk *free head*) pilih/tarik garis sesuai titik $Q_u/K_p \cdot D^3 \gamma$, untuk mendapatkan Q_u (kN).



Gambar II.10 Tiang Pendek Pada Tanah Pasir (Das, 1999)

- d. Tiang panjang pada kondisi *free head* atau *fixed head* pada tanah pasir Menggunakan $M_y / K_p D^3 \gamma$ (e_0/D untuk *free head*) pilih/tarik garis sesuai titik $Q_u/K_p \cdot D^3 \gamma$, untuk mendapatkan Q_u (kN).



Gambar II.11 Tiang Panjang Pada Tanah Pasir (Das, 1999)

9. Menghitung kapasitas dukung lateral izin maximum, Q_m .

$$Q_m = Q_u / 2,5 \text{ (kN)}$$

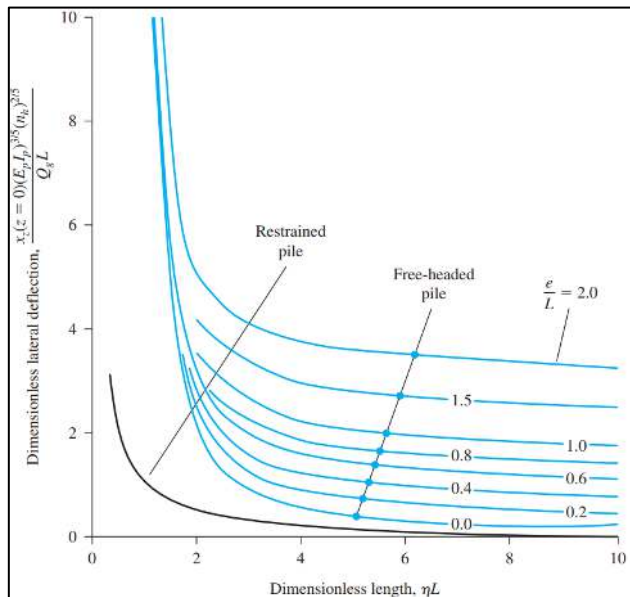
10. Menghitung beban yang bekerja pada tiang, Q_a (kN).

Hitung Q_a sesuai dengan defleksi yang diberikan pada permukaan tanah (y).

Jika, Q_a dan y tidak diberikan, maka perlu substitusi nilai Q_m dari tahap 10 untuk nilai Q_a . Berikut penyelesaiannya:

- a. *Free* atau *fixed head* pada tanah lempung

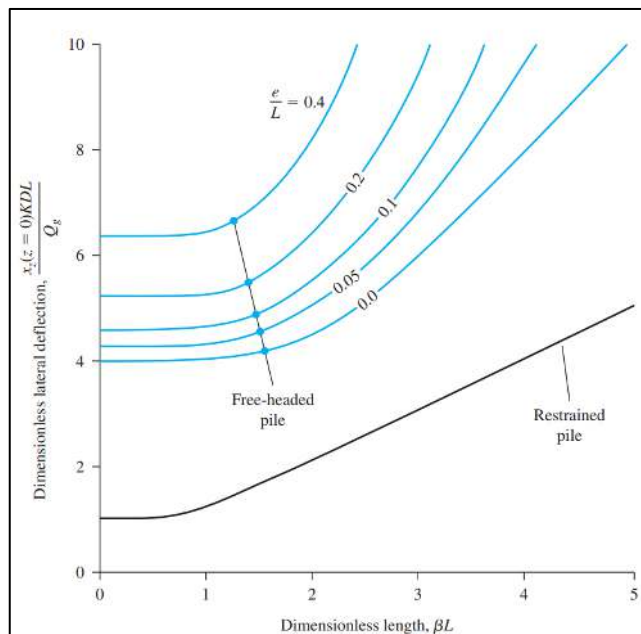
Gunakan $\beta_h L$ (e_o/L untuk *free head*) pilih sesuai nilai dari $yK_h DL/Q_a$ dan selesaikan untuk mendapat Q_a (kN) atau y (m).



Gambar II.12 Defleksi Pada Permukaan Tanah Pada Tanah Lempung (Das, 1999)

b. *Free* atau *fixed* head pada tanah pasir

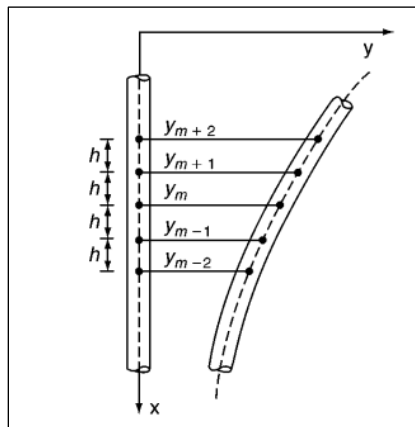
Gunakan ηL (e_o/L untuk *free head*) pilih sesuai nilai dari $y(EI)^{3/5} K_h^{2/5}/Q_a$.D dan selesaikan untuk mendapat Q_a (kN) atau y (m).



Gambar II.13 Defleksi Pada Permukaan Tanah Pada Tanah Pasir (Das, 1999)

II.6.3 Metode Kurva p-y

Metode kurva p-y digunakan dalam memodelkan interaksi tiang dengan tanah disekitarnya, kurva ini menunjukkan hubungan antara beban lateral dengan respon tiang. Sehingga defleksi tiang dan tahanan lateral tanah diketahui. Secara umum, kurva non-linier tergantung pada beberapa parameter seperti kedalaman dan kekuatan geser tanah. Transfer beban dalam arah lateral didasarkan seperti persamaan balok-kolom, persamaan balok-kolom merupakan persamaan diferensial yang didaapat dari analisis tiang dengan membagi tiang menjadi elemen-elemen kecil. Penurunan persamaan diferensial untuk balok-kolom pada pondasi dilakukan oleh Hetenyi (1946). Setelah itu reaksi tiang dengan tanah dapat digambarkan dengan kurva p-y.



Gambar II.14 Pembagian Tiang menjadi beberapa bagian dan representasi Tiang yang Terdefleksi (Matlock, 1970)

Reese (1960) dalam penelitiannya menjelaskan prosedur untuk membuat p-y berdasarkan percobaan dengan menggunakan berbagai tiang dalam menahan gaya lateral dan didasarkan pada perilaku tanah. Terdapat dua asumsi dalam penentuan kurva p-y, yaitu.

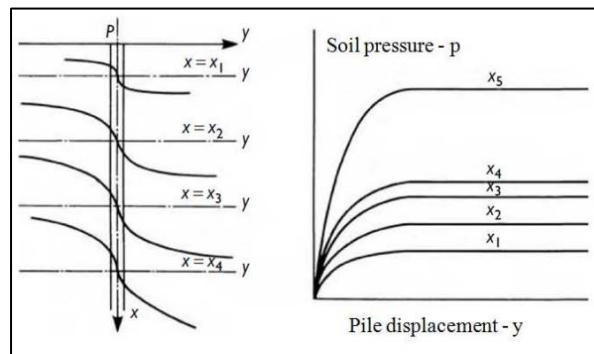
1. Kurva p-y mendefinisikan pergerakan lateral tanah akibat gaya horizontal dengan membagi tiang menjadi bagian pada setiap kedalaman.
2. Kurva p-y tidak bergantung pada bentuk dan kekakuan tiang pancang, selain itu pembagian beban statik dan di bawah masing-masing penampang tidak berpengaruh, sehingga kurva ini hanya menghitung lendutan berdasarkan kekuatan tahanan tanah pada kedalaman tersebut.

Persamaan diferensial untuk tiang yang dibebani secara lateral dengan mengansumsikan bahwa tiang adalah linear elastik, adalah:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^2} + P \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0$$

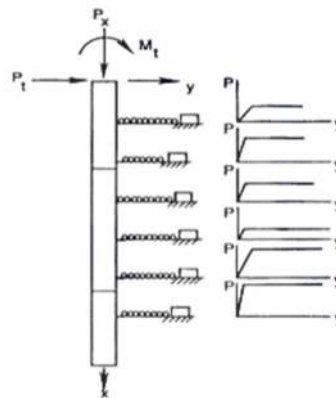
Dengan:

EI = kekauan lentur (*flexural rigidity*) dari tiang
 y = defleksi lateral di titik x sepanjang tiang
 P = beban aksial pada tiang
 p = reaksi tanah per unit tiang



Gambar II.15 (a) Bentuk Kurva p-y di Beberapa Kedalaman (b) Kurva diplot pada sumbu-sumbu yang sama (Matlock, 1970)

Dalam pembuatan kurva p-y, program LPILE/Group 8 telah menyediakannya dalam berbagai kondisi (*pinned head, fixed head dan elastically restrained*). Hasil dari program LPILE merupakan gambaran perilaku tiang tunggal dalam menghadapi gaya lateral. Output dari hasil Analisa pada program LPILE berupa kurva p-y desain di tiap lapisan tanah beserta kurva defleksi tiang, rotasi, momen, dan geser sebagai fungsi kedalaman tanah.



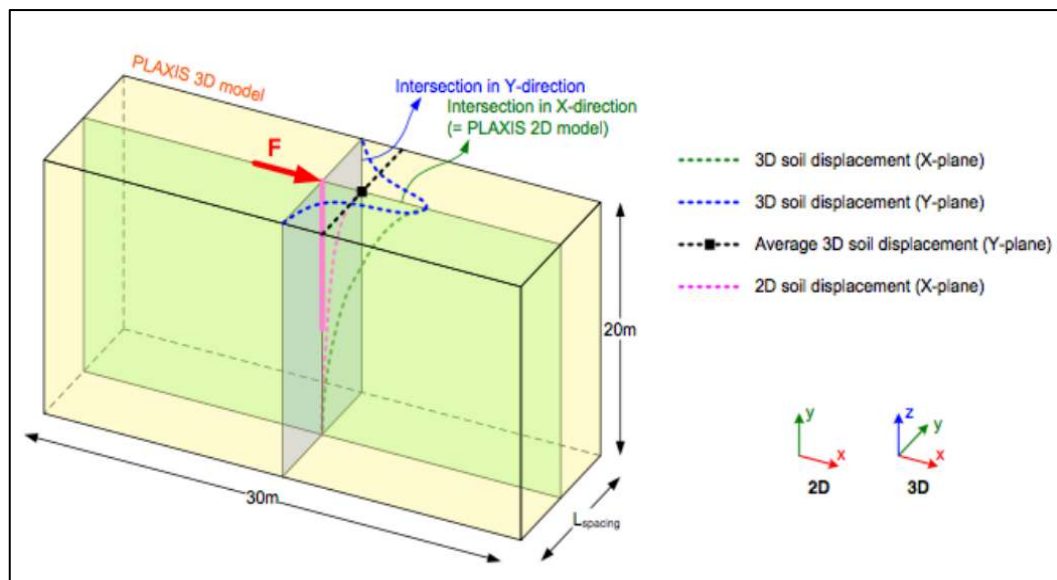
Gambar II.16 Pemodelan Kurva p-y dengan program LPILE (Matlock, 1970)

II.6.4 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (FEM) adalah metode numerik untuk memecahkan masalah secara rekayasa matematis. Dalam metode ini, elemen masalah (struktur atau tanah) dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, bagian yang kecil ini disebut sebagai elemen hingga. Bisa berbentuk segitiga, segiempat, atau berbentuk lengkungan. Elemen-elemen tersebut digabungkan dengan integrasi nimerik dan mensimulasikan perilaku seluruh elemen. Deformasi elemen berdasarkan perpindahan dari titik nodal. Salah satu program metode elemen hingga yang sering digunakan untuk menganalisis suatu permasalahan dalam bidang geoteknik adalah program PLAXIS 2D dan 3D.

PLAXIS 2D dan 3D sering digunakan dalam menganalisa masalah geoteknik, salah satunya adalah analisa pondasi tiang. Menurut Brinkgreve (2015), pondasi tiang pada PLAXIS 2D digunakan *Embedded Beam Rows* dan PLAXIS 3D digunakan *Embedded Beam* atau *volume pile*.

Berikut merupakan perbedaan dan batasan pemodelan pondasi tiang menggunakan *embedded beam* pada PLAXIS 2D dan 3D menurut Sluis (2012).



Gambar II.17 Perbedaan Perilaku Perpindahan akibat Beban pada PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D

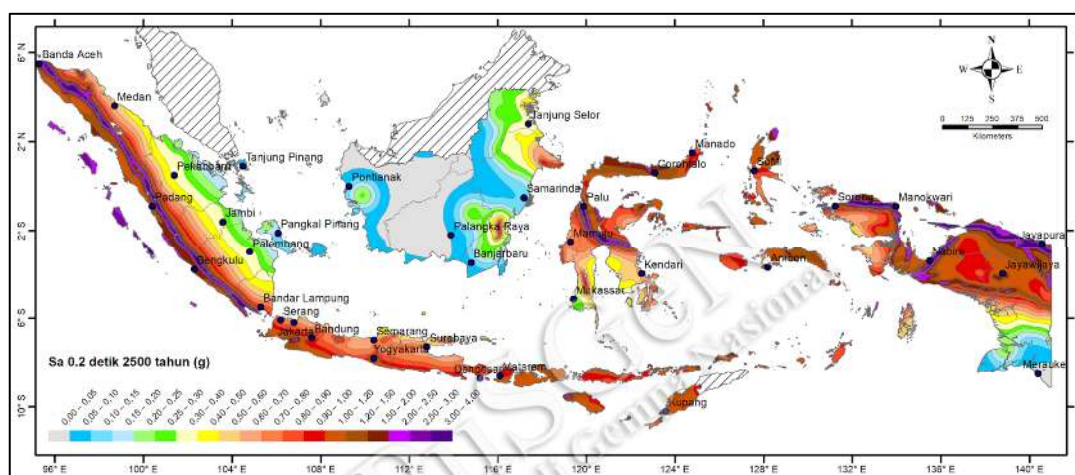
Berdasarkan gambar perilaku perpindahan (*displacement*) akibat beban, pada 3D *displacement* memiliki komponen arah x,y, dan z sedangkan pada 2D *displacement* hanya pada 2 arah yaitu x dan y. Menurut Sluis (2012) dalam penelitiannya

pemodelan dari 2D dan 3D harus dianggap sama dengan merekayasa nilai $L_{spacing}$ pada 2D dengan disesuaikan panjang dari arah y. Contoh, jika panjang arah y adalah 1 meter, maka $L_{spacing}$ pada analisa 2D adalah 1 meter.

Dalam menganalisis menggunakan program PLAXIS perlu adanya model material/pemodelan tanah untuk mensimulasikan kondisi tanah. Ada banyak model material tanah yang bisa digunakan, namun menurut Jie, Sin (2012), dalam mensimulasikan pondasi tiang pada PLAXIS, model hardening soil lebih baik dan menggambarkan kondisi realistik dalam memperkirakan *settlement* atau *displacement* dibanding Mohr Coulomb. Sedangkan berdasarkan buku manual PLAXIS, dalam analisis dinamik model Hardening Soil Small Strain sering digunakan pada PLAXIS karena mensimulasikan regangan dalam kondisi dinamik.

II.7 Beban Gempa

Beban siklik adalah beban yang terjadi berulang pada suatu struktur. Gempa merupakan salah satu contoh dari beban siklik. Gempa bumi merupakan getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Gelombang seismik adalah rambatan energi yang disebabkan karena adanya gangguan didalam kerak bumi. Energi yang dilepaskan tersebut dirambatkan oleh pusat gempa berupa gelombang getaran ke permukaan tanah. Akibat dari rambatan gelombang gempa, terjadi gaya geser siklik dinamik dari lokasi pusat gempa sampai permukaan bumi atau tanah.

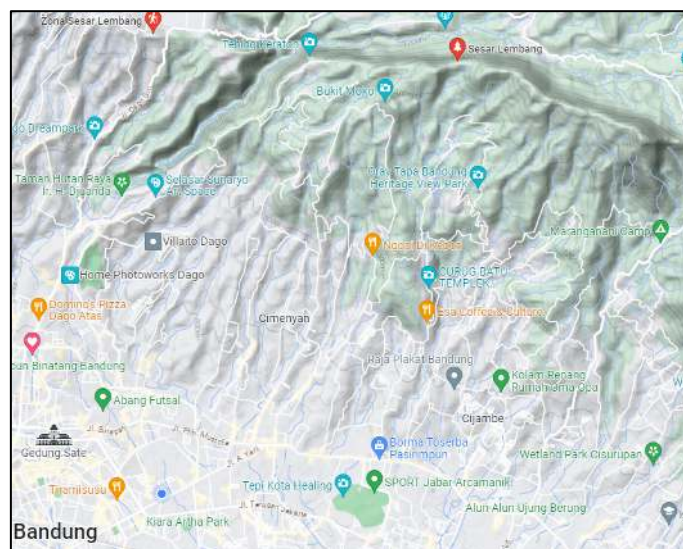


Gambar II.18 Peta Gempa (SNI 1726:2019)

II.7.1 Sumber Gempa

Sumber gempa adalah zona yang diidentifikasi dari data geologi, geodesi, geofisika dan aspek kegempaan sehingga mempunyai potensi yang menimbulkan gempa di waktu mendatang (Asrurifak M., 2010). Pada penelitian ini sumber gempa yang digunakan akan mengacu pada data-data sumber gempa yang didapatkan berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022).

Salah satu sumber gempa yang merupakan sumber terdekat dari lokasi penelitian adalah Sesar Lembang (*Lembang Fault*). Sesar Lembang secara topografi tergambar sebagai garis yang memanjang di utara Kota Bandung, Jawa Barat (Tjia, 1968). Sesar ini merupakan terusan dari ujung utara sesar Cimandiri dan panjangnya mencapai kurang lebih 30 km (Visser, 1922).



Gambar II.19 Lokasi Sesar Lembang (Google, 2023)

Berdasarkan studi geodesi, *slip rate* sesar Lembang diperkirakan sebesar 6 mm / tahun dengan pergerakan geser sinistral (Meilano, 2012). Menurut Badan Klimatologi dan Geofisika (BMKG) pada tahun 2017 (<https://www.bmkg.go.id/>) Sesar Lembang ini menunjukkan laju pergeseran mencapai 5 mm/tahun, sedangkan hasil pemantauan BMKG juga menunjukkan aktivitas seismik dengan kekuatan kecil yang artinya Sesar Lembang ini masih aktif.

II.7.2 Mekanisme Sumber

Mekanisme sumber merupakan salah satu parameter utama dalam penentuan dan modifikasi gerak tanah. Oleh karena itu data M dan R disajikan untuk tiga kondisi mekanisme sumber yang berkontribusi terhadap kegempaan di Indonesia.

1. *Shallow Crustal* (Sesar dangkal)
2. *Benioff* (Subduksi intraslab)
3. *Megathurst* (Interface)

II.7.3 Pergerakan Tanah (*Ground Motion*)

Ground Motion adalah gerak tanah yang disebabkan oleh gempa bumi. Dalam rekayasa kegempaan, gerakan tanah atau *ground motion* juga dikenal dengan *Strong motion* yang lebih menekankan pada percepatan tanah akibat gempa daripada respon tanah lainnya. Secara umum pengertian pergerakan tanah akibat gempa bumi lebih ditujukan pada percepatan tanah. Khusus untuk keperluan teknis, percepatan tanah akibat gempa merupakan data yang sangat penting (Pawirodikromo, 2012).

Data *ground motion* di Indonesia sangat terbatas, maka perlu adanya pendekatan dengan lokasi lain yang memiliki data *ground motion*. Pendekatan tersebut dipertimbangkan dari nilai magnitudo (M) dan jarak (R) berdasarkan pada hasil total probabilitas pada lokasi yang ditinjau untuk periode ulang gempa dan periode fundamental struktur tertentu dengan mencari hubungan antara magnitudo dan jarak (Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa, 2022). Dari data pada Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa, nilai magnitudo Sesar Lembang adalah 6,8 dan berjarak 29,5 km.

II.7.4 Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs merupakan salah satu kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan yang ditentukan oleh lapisan tanah, ditentukan berdasarkan profil tanah lapisan 30 meter paling atas melalui penyelidikan tanah lapangan dan di laboratorium. Klasifikasi situs berfungsi menentukan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs/lokasi. Berikut merupakan kelas situs berdasarkan SNI 1726:2019.

Tabel II.10 Klasifikasi Situs SNI 1726:2019

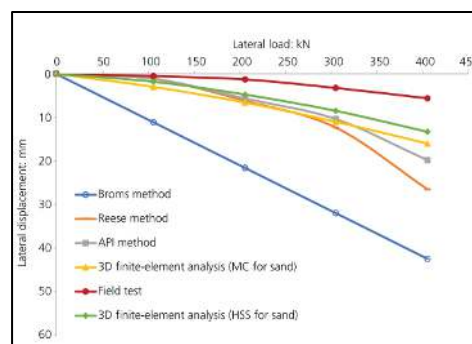
Kelas situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{cs}	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	<15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralis, $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus,yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

II.8 Studi Terdahulu

II.8.1 Empirical And Numerical Study of The Static Lateral Response of Socketed Pile in Dubai (Mughidea O, dan Alzo'ubi, 2022)

Mughidea O, dan Alzo'ubi (2022) melakukan penelitian kapasitas dukung lateral pondasi tiang soket yang dilakukan di Dubai dengan metode elemen hingga 3D (PLAXIS 3D), LPILE (kurva p-y) dan metode Broms. Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah membandingkan hasil dari metode Broms, FEM, dan kurva p-y.

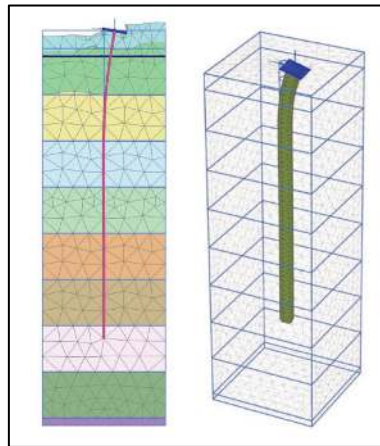
Hasil dari analisis menunjukkan metode Broms lebih kecil dan konservatif dari kurva p-y dan FEM 3D. Jika dipraktikkan dalam desain, metode Broms akan mengakibatkan overdesain yang mengarah ke biaya yang lebih tinggi. Berikut merupakan hasil dari analisis metode Broms, FEM 3D dan kurva p-y.



Gambar II.20 Hasil analisis Broms, FEM 3D dan kurva p-y (Mughidea O, 2022)

II.8.2 Comparative Analysis of Single Pile with Embedded Beam Row and Volume Pile Modeling under Seismic Load (Putri Sumarsono et al., 2023)

Penelitian yang dilakukan oleh Putri Sumarsono pada tahun 2023 yaitu melakukan penelitian terhadap defleksi lateral pada pondasi tiang menggunakan FEM 2D dan FEM 3D akibat adanya beban gempa. Tujuan dari penelitian tersebut adalah membandingkan hasil analisis FEM 2D dengan model tiang menggunakan *Embedded Beam Row* dan hasil analisis FEM 3D menggunakan *Volume Pile*.



Gambar II.21 Model FEM 2D dengan *Embedded Beam Row* dan Model FEM 3D dengan *Volume Pile*

Hasil dari penelitiannya adalah defleksi menggunakan FEM 2D (*Embedded*) lebih besar daripada defleksi menggunakan FEM 3D (*volume*) karena FEM 3D dapat meningkatkan interaksi antara tanah dan tumpukan karena memiliki gesekan faktor (antarmuka) sehingga defleksi yang terjadi lebih kecil.

II.8.3 Defleksi Lateral Tiang Tunggal Akibat Beban Lateral Pada Tanah Lempung (Jirjisul Ba'ist et al., 2020)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Jirjisul Ba'ist (2020) dilakukan komparasi antar FEM 2D (PLAXIS 2D) dengan FDM (AllPile) dengan variasi beban sebesar 10 kN, 15 kN dan 20 kN yang diberikan pada kepala tiang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan defleksi menggunakan FEM dan FDM.

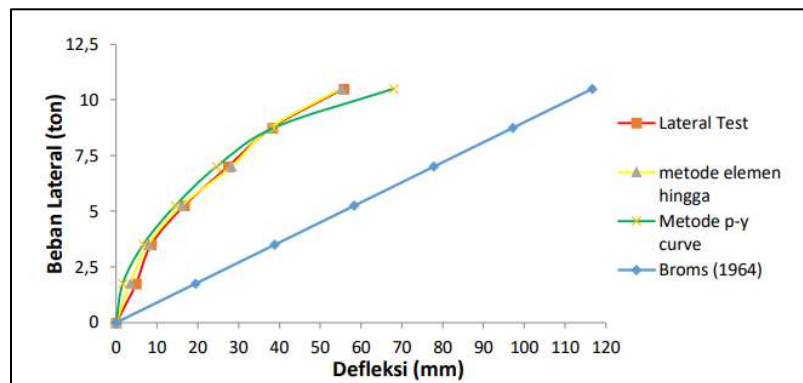
Hasil perhitungan defleksi lateral tiang pada metode kurva p-y dengan penyelesaian beda hingga, program FDM (AllPile), dan FEM 2D berturut-turut dengan beban lateral sebesar 10 kN adalah 1.21 cm; 0.27 cm, beban lateral sebesar 15 kN adalah 2.13 cm; 0.4051 cm, dan beban lateral sebesar 20 kN adalah 3.14 cm; 0.5402 cm.

Dengan demikian batas beban defleksi lateral yang diberikan adalah 15 kN, agar tidak melebihi batas defleksi lateral izin sebesar 2,54 cm. Rekomendasi metode yang digunakan adalah program AllPile agar lebih mendapatkan tingkat keamanan dari defleksi lateral tiang ketika diterapkan di lapangan.

II.8.4 Analisis Defleksi Lateral Tiang Tunggal *Free-End Pile* Pada tanah Kohesif (Kristianto *et al.*, 2017)

Penelitian yang dilakukan oleh Kristianto dkk (2017) tentang defleksi pondasi tiang pancang tunggal dengan metode Broms, FEM dan Kurva p-y yang dibandingkan dengan hasil uji lateral di lapangan. Tujuan penelitian yang dilakukan adalah mengetahui perbandingan defleksi dari analisis menggunakan metode Broms, Fem dan kurva p-y yang selanjutnya dibandingkan dengan hasil uji lateral di lapangan.

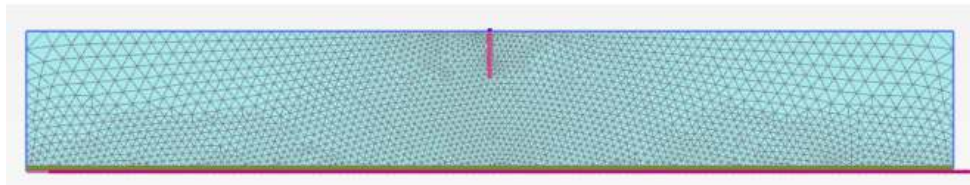
Hasil dari analisis adalah bahwa defleksi metode Broms sangat jauh dari hasil uji lateral di lapangan, sedangkan hasil dari Kurca p-y dan FEM mendekati hasil dari uji lateral di lapangan.



Gambar II.22 Perbandingan Defleksi (Kristianto dkk, 2017)

II.8.5 Modelling of Dynamic Pile Behavior During an Earthquake Using PLAXIS 2D (2015)

Penelitian yang dilakukan oleh B. van der Kwaak pada tahun 2015 tentang interaksi tanah-struktur akibat gempa pada daerah Groningen, Belanda dengan metode FEM yang dibantu program PLAXIS 2D. Tujuan dari penelitian tersebut adalah mengetahui perilaku pondasi tiang kondisi dinamik (beban gempa). Tanah pada lokasi tersebut adalah lempung dan diasumsikan 1 lapisan saja.



Gambar II.23 Model Dinamik FEM 2D (B. van der Kwaak, 2015)

Dalam simulasi yang dilakukan dalam program PLAXIS model material yang digunakan adalah *Hardening Soil Small Strain (HS-Small Strain)* sesuai yang disarankan manual PLAXIS.

Hasil dari penelitiannya adalah beban gempa sangat berpengaruh terhadap perilaku pondasi tiang. Akibat beban siklik yang diakibatkan oleh gempa, defleksi pada tiang akan bertambah, bending moment dan kapasitas dukung lateral akan berkurang.

II.8.6 *Effect of Earthquake on Combined Pile–Raft Foundation (Deepankar Choudhury, Ashutosh Kumar, dan Rolf Katzenbach, 2016)*

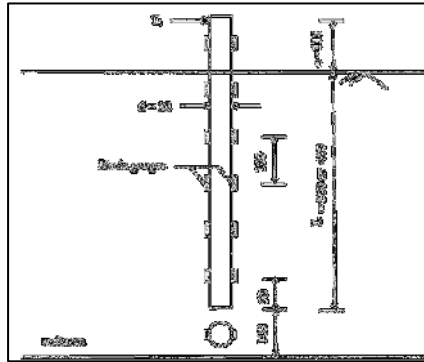
Penelitian yang dilakukan oleh Deepankar Choudhury, Ashutosh Kumar, dan Rolf Katzenbach pada tahun 2016 (Kumar et al., 2016) berkaitan dengan analisis efek beban gempa terhadap perilaku sistem pondasi *pile raft*. Penelitian ini melakukan pengujian centrifuge dan membandingkan terhadap model numerik kondisi pseudostatik dengan bantuan program PLAXIS 3D. Studi kasus pada sistem pondasi piled raft tower Messeturm di Jerman yang dimodelkan dan analisis menggunakan program PLAXIS 3D Ver 5.10 dengan analisis dalam dua kondisi tanah yaitu tanah pasir dan tanah lempung.

Hasil dari penelitian ini adalah Studi numerik menganalisis uji centrifuge dinamik menggunakan Software ABAQUS 5.8 dengan hasil yang mendekati dan dianggap sebagai validasi yang baik dari model ini. Setelah itu, analisis pseudostatik dan dinamik dilakukan di bawah kondisi beban gempa yang berbeda. Diamati bahwa pertambahan persentase maksimum beban pseudostatik bervariasi dari 62% menjadi 76%.

Hasil yang diperoleh melalui analisis pseudostatik sedikit berbeda dengan analisis dinamik karena pertimbangan frekuensi alami media tanah dan input karakteristik gerak dimasukkan dalam analisis dinamik, sedangkan analisis pseudostatik hanya mempertimbangkan PGA.

II.8.7 Response of Static and Cyclic Laterally Loaded Rigid Piles in Sand (Hongyu Qin dan Wei Dong Guo, 2016)

Penelitian yang dilakukan oleh Hongyu Qin dan Wei Dong Guo (2016) tentang respon *rigid pile* akibat adanya beban statik dan siklik di laboratorium pada tanah asir bertujuan untuk mengetahui respon berupa defleksi pada *rigid pile*. Berikut merupakan mekanisme pembebanan pada pengujian di laboratorium.



Gambar II.24 Mekanisme Pembebanan Uji Lateral Laboratorium (Qin dan Guo, 2016)

Hasil dari pengujian tersebut adalah menunjukkan dampak besar dari gerakan lateral (siklik) tingkat beban daripada jumlah siklus, peningkatan 1,5–2,8 kali dalam modulus k , dan penurunan 10% dalam p_u karena pemuatan siklik. Tes mengkonfirmasi korelasi linier antara momen lentur maksimum dan beban lateral yang diterapkan, berapa pun jumlahnya siklus.

II.8.8 Analysis and Design of Micropile-Supported Wall to Resist Lateral Deflection of Existing Railroad Bridge Abutment (Samer R dan Rabab'ah, 2014)

Penelitian ini dilakukan pada Proyek Jembatan Sky TrainTM di Bandara Phoenix Sky, Arizona. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui defleksi/deformasi micropile sebagai penopang abutment dengan FEM 2D (PLAXIS 2D) yang dibandingkan dengan hasil dari metode kurva p - y (LPILE).

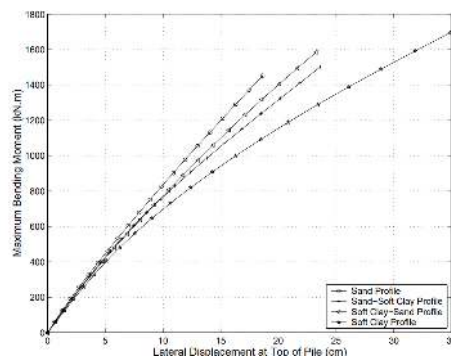
Hasil menunjukkan defleksi dari program LPILE lebih besar daripada PLAXIS 2D dan hasil dari pemodelan menggunakan program PLAXIS 2D menunjukkan bahwa solusi yang diusulkan dianggap memadai untuk memberikan stabilitas yang dibutuhkan dengan faktor keamanan yang dapat diterima, bersamaan dengan defleksi yang dapat diterima.

II.8.9 *Dynamic analysis of Laterally loaded pile groups in sand and clay (Mostafa Y dan El Naggar M, 2002)*

Menurut Mostafa Y dan El Naggar pondasi tiang tidak hanya menahan beban yang bermuatan statis namun juga bermuatan dinamis. Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai defleksi akibat beban statis dan dinamis pada tanah lempung dan tanah pasir. Analisis yang diusulkan merupakan menggabungkan pendekatan kurva p-y statis dan asumsi regangan bidang untuk mewakili reaksi tanah dalam kerangka model Winkler. Hasil dari penelitian ini adalah defleksi pada kondisi statis lebih kecil daripada kondisi dinamis baik pada tanah lempung maupun tanah pasir, namun defleksi pada tanah pasir dengan kondisi dinamik lebih besar daripada tanah lempung dengan kondisi dinamik.

II.8.10 *Numerical Analysis of Behavior under Lateral Loads in Layered Elastic-Plastic Soils (Zhaohui Yang dan Boris Jeremic , 2002)*

Penelitian yang dilakukan Zhaohui Y dan Boris Jeremic tentang analisis defleksi pondasi tiang pada tanah 1 lapis (lempung saja atau pasir saja) dan tanah berlapis (lempung-pasir atau pasir-lempung) dengan metode kurva p-y yang dibantu dengan program LPILE. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besar defleksi dari pondasi tiang pada kondisi tanah yang bervariasi yaitu pada tanah 1 lapis (lempung saja atau pasir saja) dan tanah berlapis (lempung-pasir atau pasir lempung).



Gambar II.25 Defleksi (Zhaohui dan Boris, 2002)

Defleksi pondasi pada tanah pasir lebih kecil daripada tanah lempung dan berlapis dan Defleksi pada tanah berlapis lempung-pasir mendekati tanah pasir-lempung). Perbedaan tersebut disebabkan oleh input material dari masing-masing kondisi tanah berbeda.

Tabel II.11 Studi Terdahulu

No.	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Objek Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Perbedaan
1	Mughidea O Alzo'ubi A, Akash S (2022)	<i>Empirical and numerical study of the static lateral response of socketed pile in Dubai</i>	Kapasitas dukung Lateral dan Defleksi pada tanah pasir	Metode Broms, kurva p-y, FEM 3D.	Metode Broms lebih konservatif (kecil) daripada kurva p-y dan FEM 3D	Analisis statik dengan Broms, Kurva p-y, FEM 2D dan 3D pada tanah pasir, lempung dan berlapis.
2	Putri Sumarsono et al., (2023)	<i>Comparative Analysis of Single Pile with Embedded Beam Row and Volume Pile Modeling under Seismic Load</i>	Perilaku pondasi tiang pada model 2D menggunakan embedded beam dan 3D menggunakan volume	Metode elemen hingga 2D dan 3D	Pada 2D menggunakan <i>embedded beam</i> , defleksi tiang lebih besar daripada 3D yang menggunakan <i>volume</i>	Analisis metode elemen hingga 2D dan 3D dengan keduanya menggunakan <i>embedded beam</i>
3	Jirjisul Ba'ist et al., 2020	Defleksi Lateral Tiang Tunggal Akibat Beban Lateral Pada Tanah Lempung	Defleksi Tiang Tunggal Pondasi Tiang Tunggal	Dengan program AllPile, dan FEM 2D. Dengan variasi beban sebesar 10 kN, 15 kN, dan 20 kN	Metode yang direkomendasikan adalah AllPile agar lebih mendapatkan tingkat keamanan dari defleksi ketika diterapkan dilapangan.	Analisis statik dengan Broms, Kurva p-y, FEM 2D dan 3D.

4	Kristianto, Niken Silmi Surjandari, dan Noegroho D (2017)	Analisis Defleksi Lateral Tiang Tunggal <i>Free-End Pile</i> Pada Tanah Kohesif	Defleksi Pondasi Tiang Pancang Tunggal	Menganalisis defleksi tiang dengan Broms, FEM dan Kurva p-y yang dibandingkan dengan hasil uji lateral.	Hasil penelitian ini adalah kurva p-y dan FEM lebih mendekati hasil uji lateral dibandingkan Broms,	Menggunakan FEM 3D dengan batas defleksi 6 mm dan 12 mm. Serta beban lateral tidak ditentukan
5	Ashutosh Kumar, Deepankar Choudhury, dan Rolf Katzenbach (2016)	<i>Effect of Earthquake on Combined Pile-Raft Foundation</i>	Analisis efek beban gempa terhadap perilaku sistem pondasi <i>pile raft</i> pada kondisi tanah homogen	Membandingkan model numerik kondisi pseudostatik dengan bantuan program PLAXIS 3D	Analisis dengan beban pseudostatik sedikit berbeda dengan analisis dinamik karena pertimbangan frekuensi alami media tanah yang dimasukkan ke dalam analisis dinamik, sedangkan analisis pseudostatik hanya mempertimbangkan PGA.	Analisis menggunakan FEM 3D dengan beban dinamik pada tanah berlapis (lempung-pasir)
6	Hongyu Qin dan Wei Dong Guo (2016)	<i>Response of Static and Cyclic Laterally Loaded Rigid Piles in Sand</i>	Respon Rigid Pile akibat beban siklik	Uji laboratorium rigid pile pada tanah pasir	Beban siklik sangat berpengaruh terhadap defleksi	Analisis kapasitas dukung lateral dan defleksi dengan kurva p-y dan FEM 2D dan 3D.

7	B.van der Kwaak (2015)	<i>Modelling of Dynamic Pile Behavior During an Earthquake Using PLAXIS 2D</i>	Interaksi tanah struktur pada pondasi tiang pada tanah 1 lapis (lempung)	Metode Elemen Hingga 2 dimensi dengan model material HS- <i>Small Strain</i>	Akibat beban siklik yang diakibatkan oleh gempa, defleksi pada tiang akan bertambah, bending moment dan kapasitas dukung lateral akan berkurang.	Analisis dinamik pada kondisi tanah lempung, pasir dan berlapis dengan FEM 3D.
8	Samer R. Rabab'ah (2014)	<i>Analysis and design of Micropile-Supported Wall to Resist Lateral Deflection of Existing Railroad Bridge Abutment</i>	Defleksi pondasi micropile	Metode Kurva p-y (LPILE) dan FEM 2D (PLAXIS 2D)	Defleksi pada metode kurva p-y lebih besar daripada FEM 2D.	Dilakukan dengan Metode Broms, Kurva p-y dan FEM 2D dan 3D
9	Mostafa Y dan El Naggat M (2002)	<i>Dynamic analysis of laterally loaded pile groups in sand and clay</i>	Defleksi tiang pada tanah lempung dan pasir.	Metode winkler dibandingkan dengan hasil tes lapangan	Pada kasus ini defleksi tanah pasir lebih besar daripada tanah lempung	Analisis menggunakan FEM 2D dan 3D.
10	Zhaohui Yang dan Boris Jeremic (2002)	<i>Numerical Analysis of Pile Behavior under Lateral Loads in Layered Elastic–Plastic Soils</i>	Perilaku pondasi tiang (defleksi) pada tanah 1 lapis dan berlapis	Metode kurva p-y	Defleksi tanah lempung lebih besar dari pada tanah pasir dan berlapis.	Analisis kapasitas dukung lateral dan defleksi dengan metode Broms, FEM 2D dan 3D.