

**BATASAN KEKAKUAN PONDASI PELAT KAKU DI ATAS TANAH ELASTIS**Ketut Ardhana<sup>1</sup>, Made Sukrawa<sup>2</sup>, dan I Ketut Sudarsana<sup>2</sup>

**Abstrak:** Pondasi pelat umumnya dirancang dengan anggapan distribusi reaksi tanah dasar adalah linier sehingga analisis dapat dilakukan dengan metode konvensional (metode rigid). Anggapan ini benar bila kekakuan pondasi memadai. Untuk pondasi pelat yang kurang kaku dipilih metode lain yaitu metode fleksibel, yang memperhitungkan variasi dari distribusi reaksi tanah dasar akibat pengaruh fleksibilitas pondasi dan perilaku elastis tanah dasarnya. Penelitian ini bertujuan mencari batasan kekakuan pondasi pelat yang dianggap kaku di atas tanah elastis.

Metode penelitian dilakukan dengan menganalisis 2 (dua) tipe pondasi pelat yaitu pondasi pelat dengan kolom tunggal (pondasi pelat tunggal) yang terdiri dari 6 (enam) ukuran dan pondasi pelat gabungan dengan dua kolom (pondasi pelat gabungan) yang terdiri dari 5 (lima) ukuran. Pondasi tersebut ditumpu di atas tanah elastis dengan 12 (dua belas) variasi modulus reaksi tanah dasar ( $ks$ ) yang berbeda. Analisis dilakukan dengan program berbasis metode elemen hingga dengan metode eksak sebagai pembandingnya. Dalam proses analisis, masa tanah dimodel sebagai kumpulan pegas (*elastic spring*) yang berdiri sendiri dan tidak saling berhubungan, sedangkan pondasi dimodel dengan elemen shell (shell element).

Dari 132 sampel pondasi yang ditinjau, diperoleh hasil bahwa batasan kekakuan pondasi pelat kaku di atas tanah elastis, merupakan besaran tak berdimensi ( $d$ ) yang nilainya 0,79, dan tebal minimum pondasi pelat kaku dapat dinyatakan dengan Persamaan :  $d = 1,975 \cdot [ks \cdot l^4 / E_c]^{1/3}$  dimana  $E_c$  adalah modulus elastisitas material pondasi ( $kN/m^2$ ),  $ks$  adalah modulus reaksi tanah dasar ( $kN/m^3$ ),  $l$  adalah panjang pondasi (m) dan  $d$  adalah persamaan karakteristik Pondasi pelat dengan tebal kurang dari tebal minimum  $d$ , dikategorikan sebagai pondasi fleksibel, dan oleh karenanya analisis sebaiknya memakai metode fleksibel untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Kata kunci: batas kekakuan, pondasi kaku, tanah elastis, modulus reaksi, tanah dasar, elemen shell.

**RIGIDITY LIMIT OF SPREAD FOOTING ON ELASTIC SOIL**

**Abstract:** Spread footing is commonly designed by assuming linear distribution of subgrade reaction, so that, conventional method (rigid method) of analysis can be used. This assumption is true for adequate thickness of footing. For more flexible footing, alternative method, called flexible method, which considering varying distribution of subgrade reaction, due to flexibility of footing and elasticity of base soil, is more appropriate. This research is to determine the rigidity limit of spread footing on elastic soil.

The research method is done by analyzing two types of spread footing, i.e. single (or isolated) footing consists of six different sizes and combined footing consists of five different sizes. Footings are supported on elastic soil with twelve different modulus of the subgrade reaction. The analysis is done utilizing finite element based software and using exact method as comparison. Soil is modeled as independent spring, and footing is modeled using shell elements.

<sup>1</sup> Alumnus dari Program Magister Teknik Sipil, Program Pasca Sarjana, Universitas Udayana, Denpasar.

<sup>2</sup> Dosen Program Magister Teknik Sipil, Program Pasca Sarjana, Universitas Udayana, Denpasar.

From analysis of 132 sample footings, it is obtained that the rigidity limit of spread footings on elastic soil is a non dimensional parameter, ( $\lambda$ ), of 0,79, and the minimum thickness of rigid footing can be expressed using equation:  $d=1,975 \cdot [k_s \cdot l^4 / E_c]^{1/3}$  where  $E_c$  is modulus elasticity of footing material ( $\text{kN/m}^2$ ),  $k_s$  is modulus of subgrade reaction ( $\text{kN/m}^3$ ),  $l$  is the length of spread footing (m) and  $\lambda$  is the characteristic equation. Footing with thickness less than  $d$ , is therefore categorized as a flexibel footing, accordingly, that footing should be analyzed using flexible methode to obtain more accurate results.

Keywords: rigidity limit, rigid footing, elastic soil, subgrade reaction modulus, shell element.

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Perancangan pondasi pelat suatu struktur umumnya dilakukan dengan memakai metode konvensional (metode pondasi kaku) yang menganggap distribusi reaksi tanah dasar dibawah pondasi adalah linier. Anggapan ini tercapai apabila pondasi tersebut mempunyai kekakuan yang sangat besar.

Namun sesuai dengan teori analisis elastisitas (*Borowicka*, 1936) dan berdasarkan pengalaman empiris di lapangan (*Schultze*, 1961 dan *Barden*, 1962) menunjukkan bahwa distribusi reaksi tanah di bawah pondasi yang dibebani simetris, sesungguhnya tidaklah linier, melainkan bervariasi tergantung pada fleksibilitas dari pondasi dan perilaku elastis tanah dasarnya. Sehingga metode yang cocok untuk kondisi ini adalah metode pondasi fleksibel yang memperhitungkan pengaruh kedua parameter tersebut di dalam analisisnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengamati distribusi reaksi tanah dasar pondasi, mencari tebal pondasi yang menyebabkan distribusi reaksi tanah dasar linier, mencari nilai batas pondasi pelat dalam kondisi kaku dan hubungan antar parameter yang berpengaruh dengan cara melakukan analisis terhadap pondasi pelat dengan kolom tunggal dan pondasi pelat gabungan dengan dua kolom.

Dengan memvariasikan 11 (sebelas) dimensi pondasi (6 buah untuk pondasi pelat tunggal dan 5 buah pondasi pelat

gabungan) di atas 12 (dua belas) variasi nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ) diperoleh 132 buah grafik distribusi reaksi tanah yang terjadi pada 132 buah tipe pondasi.

Analisis dilakukan dengan program komputer berbasis metode elemen hingga yaitu *SAP 2000*. dengan batasan bahwa material pondasi adalah beton bertulang, beban yang bekerja adalah beban statis terpusat (P) yang besarnya diambil berdasarkan daya dukung tanah ijin ( $q_a$ ). Nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ) adalah linier dan konstan yang besarnya diambil berdasarkan daya dukung tanah dan tanah mempunyai perilaku elastik linier, homogen dan isotropis, mengikuti model *Winkler*. Kemudian hasil analisis *SAP 2000* diverifikasi dengan program dari *Linchi Lu* (2000) dan metode eksak dari *Hetenyi* (1946) untuk mencapai hasil yang valid.

### Manfaat

Dengan diketahuinya batasan yang jelas antara pondasi pelat kaku dan pondasi pelat fleksibel, dapat dengan mudah menentukan metode yang sesuai dipakai dalam perancangan suatu pondasi pelat sehingga akurasi dan optimalisasi perancangan suatu pondasi dapat dicapai.

### Landasan Teori

Berdasarkan, distribusi reaksi tanah dasar yang terjadi, maka ada dua metode yang dipakai untuk menganalisis suatu pondasi pelat yaitu:

1. Metode pondasi kaku (*rigid footing method*) yaitu metode analisis suatu pondasi yang didasarkan pada anggapan bahwa distribusi reaksi tanah yang terjadi sepanjang penampang bawah pondasi adalah linier.
2. Metode pondasi fleksibel (*flexibel footing method*) yaitu metode analisis yang didasarkan pada distribusi reaksi tanah yang terjadi di bawah pondasi tidak linier atau bervariasi sepanjang bidang kontak pondasi .

**Metode Pondasi Kaku**

Menurut *Bowles* (1983), konsep dasar untuk menganalisis pondasi kaku, baik untuk pondasi pelat tunggal (kolom tunggal) maupun pondasi pelat gabungan dengan dua kolom adalah:

**Pondasi pelat tunggal**

Reaksi tanah :  $q_{rata} = \frac{P}{Bl}$  (1.1)

Tebal efektif pelat pondasi :  $4d^2 + 2(b+c)d = \frac{Blq}{v_c}$  (1.2)

Momen lentur/lebar :  $M = \frac{ql^2}{8}$  (1.3)

**Pondasi pelat gabungan**

Reaksi tanah:  $q_{rata} = \frac{\Sigma P}{Bl}$  (1.4)

Tebal efektif dari pondasi pelat dapat dihitung dari Persamaan (1.2). Momen lentur dan gaya lintang yang terjadi pada pondasi, didapat dengan memperlakukan pondasi tersebut sebagai balok menerus yang ditumpu oleh dua kolom.

**Metode Pondasi Fleksibel**

Ada 2 (dua) metode untuk menyelesaikan masalah pondasi fleksibel pada penelitian ini yaitu metode *Hetenyi* dan metode elemen hingga dengan SAP 2000.

**Metode Hetenyi**

Metode Hetenyi juga disebut metode eksak adalah metode penyelesaian masalah balok fleksibel dengan asumsi dasar bahwa material balok mengikuti hukum Hooke; penampang prismatis, gaya geser (*friction*) di sepanjang permukaan bidang kontak antara pondasi dan tanah dianggap

kecil dan diabaikan. Sedangkan lendutan serta reaksi tanah diasumsikan arahnya vertikal pada tiap-tiap penampang dan mengikuti model *Winkler* dimana lendutan (*y*) di bawah pondasi berbanding langsung dengan tegangan tanah (*q*) yang terjadi pada setiap penampang pondasi tersebut, seperti dinyatakan pada Persamaan (1.5).

$y = q/ks$  (1.5)

**Pondasi Pelat Tunggal**

Pondasi pelat tunggal bisa dianggap sebagai balok fleksibel, dengan beban kolom sebagai beban terpusat. sehingga gaya gaya dalam yang dihasilkan sebagai berikut:

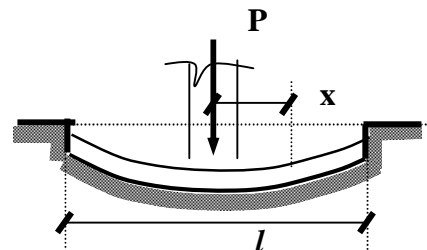
Persamaan lendutan :

$y = \frac{P\lambda}{2k} \frac{1}{\text{Sinh}\lambda l + \sin \lambda l} \left[ \begin{matrix} \text{Cosh}\lambda x \cos \lambda(l-x) + \\ \cos \lambda x \text{Cosh}\lambda(l-x) - \\ \text{Sinh}\lambda x \sin \lambda(l-x) \\ + \sin \lambda x \text{Sinh}\lambda(l-x) + \\ 2\text{Cosh}\lambda x \cos \lambda x \end{matrix} \right]$  (1.6)

Dimana :  $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$  (1.7)

$k = k_s \cdot B$  (1.8)

*EI* adalah modulus elastisitas dan momen inersia sedangkan *B* adalah lebar balok.



**Gambar 1. Model pondasi pelat tunggal di atas dasar elastis**

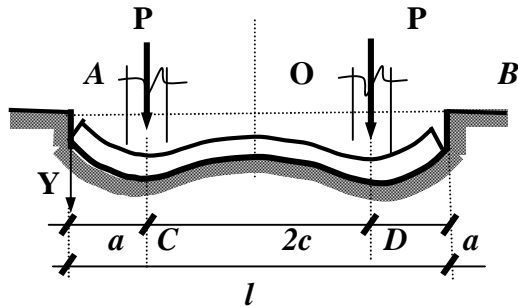
**Pondasi Pelat Gabungan**

Pondasi pelat gabungan, adalah termasuk dalam kategori balok berhingga dengan ujung bebas yang dibebani dua buah beban terpusat. Dengan *EI* yang konstan maka persamaan untuk lendutan, dapat dihitung melalui persamaan 1 (satu) dimensi sebagai berikut:

Persamaan lendutan:

$$y_{A-C} = \frac{P\lambda}{k} \frac{1}{\text{Sinh}\lambda l + \sin\lambda l} \left\{ \begin{array}{l} 2\text{Cosh}\lambda x \cos\lambda x [\text{Cosh}\lambda a \\ \cos\lambda(l-a) + \\ \text{Cosh}\lambda(l-a)\cos\lambda a] \\ + (\text{Cosh}\lambda x \sin\lambda x + \text{Sinh}\lambda x \cos\lambda x) \\ [\text{Cosh}\lambda a \sin\lambda(l-a) + \\ -\text{Sinh}\lambda a \cos\lambda(l-a) + \\ \text{Cosh}\lambda(l-a)\sin\lambda a - \\ \text{Sinh}\lambda(l-a)\cos\lambda a] \end{array} \right\} \quad (1.9)$$

$$y_{C-D} = [y_{A-C}]_{x>a} + \frac{P\lambda}{k} [\text{Cosh}\lambda(x-a)\sin\lambda(x-a) - \text{Sinh}\lambda(x-a)\cos\lambda(x-a)] \quad (1.10)$$



Gambar 2. Model pondasi pelat gabungan di atas dasar elastis

**Metode Elemen Hingga**

Pada pemecahan numerik khususnya dengan metode elemen hingga, sistim struktur merupakan rangkaian yang dibangun dari sejumlah elemen hingga, dimana satu dengan lainnya terhubung hanya pada nodal-nodalnya (Bowles, 1983). Beberapa persamaan dibuat untuk mencari hubungan gaya dan lendutan pada nodal dimulai dengan mencari hubungan antara gaya-gaya luar pada nodal {P} dengan gaya-gaya dalam element {F} berdasarkan prinsip kestimbangan, yang dinyatakan sebagai:

$$\{P\} = [A]\{F\} \quad (1.11)$$

Hubungan antara lendutan (nodal) X dan deformasi (elemen) d adalah:

$$\{d\} = [B]\{X\} \quad (1.12)$$

Dari sifat elastis elemen, hubungan F dan d dinyatakan :

$$\{F\} = [S]\{d\} \quad (1.13)$$

$$\{F\} = [S][A]^T\{X\} \quad (1.14)$$

$$\{P\} = [A]\{F\} = [A][S][A]^T\{X\} \quad (1.15)$$

Selanjutnya lendutan yang dicari {X} adalah:

$$\{X\} = ([A][S][A]^T)^{-1}\{P\} \quad (1.16)$$

Komponen [A] dan [S] adalah:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1/L & 1/L & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/L & -1/L & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1.17)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 4EI & 2EI & 0 & 0 \\ L & L & 0 & 0 \\ 2EI & 4EI & 0 & 0 \\ L & L & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Dimana :

- E : modulus elastisitas elemen (balok)
- I : momen inersia penampang elemen
- k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> : konstanta pegas (spring) tanah = (L/2).B.k<sub>s</sub>

B : lebar balok

k<sub>s</sub> : modulus reaksi tanah dasar

[A][S][A]<sup>T</sup>)<sup>-1</sup> : invers dari matrik global struktur

[S][A]<sup>T</sup>) : matrik elemen

Umumnya pemecahan masalah analisis dengan metode elemen hingga akan menjadi mudah dan cepat bila dilaksanakan dengan bantuan software. Ada dua software yang dapat dipakai untuk memecahkan masalah pondasi fleksibel yaitu SAP 2000 dan program dari Linchi Lu.

**Modulus Reaksi Tanah Dasar (k<sub>s</sub>)**

**Menentukan k<sub>s</sub> Berdasarkan Daya Dukung Tanah**

Menurut Bowles (1983), nilai k<sub>s</sub> dapat dihitung menurut metode aproksimasi berdasarkan nilai kapasitas daya dukung tanah q<sub>a</sub> :

$$k_s = 40 SF x q_a \text{ ( kN/m}^3 \text{)} \quad (1.19)$$

Persamaan ini didasarkan pada alasan bahwa q<sub>a</sub> adalah tekanan tanah ultimate dibagi oleh faktor keamanan ( safety factor) SF dengan lendutan yang terjadi sebesar 1 inci atau 2,54 cm. Biasanya SF diambil sama dengan 3 (tiga). Sehingga Persamaan (1.19) menjadi :

$$k_s = 120 x q_a \text{ ( kN/m}^3 \text{)} \quad (1.20)$$

**Menentukan  $k_s$  Berdasarkan Modulus Elastisitas Tanah.**

Vesic (1961), mengusulkan bahwa modulus reaksi tanah dasar dapat dihitung dengan menggunakan modulus elastisitas  $E_s$  tanah sebagai berikut:

$$k'_s = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)} \quad (kN/m^2) \quad (1.21)$$

$$k_s = \frac{k'_s}{B} \quad (kN/m^3) \quad (1.22)$$

Dimana :

$E_s$  = modulus elastis tanah,

$\nu$  = poisson's ratio dari tanah

$B$  = lebar pondasi

$k_s$  = modulus reaksi tanah dasar yang dicari

**Menentukan  $k_s$  Berdasarkan Jenis Tanah**

Nilai  $k_s$ , dapat juga ditentukan berdasarkan jenis tanah seperti disajikan dalam Tabel 1. dan Tabel 2.

**Tabel 1. Nilai perkiraan  $k_s$  berdasarkan jenis tanah**

Soil	$k_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
Loose sand	4800 – 16000
Medium dense sand	9600 – 80000
Dense sand	64000 – 128000
Clayey medium dense sand	32000 - 80000
Silty medium dense sand	24000 – 48000
Clayey soil	
$q_u \leq 200$ kPa	12000 – 24000
$200 < q_u \leq 400$ kPa	24000 – 48000
$q_u > 800$ kPa	> 48000

Sumber : Bowles, 1983, *Foundation Analysis And Design*, fifth edition

**Tabel 2. Nilai tipikal untuk  $k_s$  berdasarkan jenis tanah**

Soil Type	$k_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	
Sand (dry or moist)	Loose	8,000 – 25,000
	Medium	25,000 – 125,000
	Dense	125,000 – 375,000
Sand (saturated)	Loose	10,000 – 15,000
	Medium	35,000 – 40,000
	Dense	130,000 – 150,000
Clay	Stiff	12,000 – 25,000
	Very stiff	25,000 – 50,000
	Hard	> 50,000

Sumber : Das, 1998, *Principles Of Foundation Engineering*

**MATERI DAN METODE**

**Material**

Material pondasi baik untuk pondasi pelat tunggal maupun pondasi pelat gabungan dibuat dari beton bertulang dengan kuat tekan ( $f'c$ ) = 22,5 MPa, dan sesuai dengan SNI 03-2847-2002, Modulus Elastisitas ( $E_c$ ) dihitung berdasarkan persamaan  $E_c = 4700 \sqrt{f'c} = 22294,058$  Mpa atau sama dengan 22294058 kN/m<sup>2</sup>, dan berat jenis beton diambil = 24 kN/m<sup>3</sup>.

Nilai  $k_s$  dapat dihitung dengan Persamaan  $k_s = 120 q_a$  (kN/m<sup>3</sup>). Bila daya dukung tanah ijin ( $q_a$ ) diambil dari 50 kN/m<sup>2</sup> sampai dengan 600 kN/m<sup>2</sup> dengan peningkatan setiap 50 kN/m<sup>2</sup>, maka nilai  $k_s$  yang dipakai bervariasi mulai 6000 kN/m<sup>3</sup>, 12000 kN/m<sup>3</sup>, 18000 kN/m<sup>3</sup>, 24000 kN/m<sup>3</sup>, 30000 kN/m<sup>3</sup>, 36000 kN/m<sup>3</sup>, 42000 kN/m<sup>3</sup>, 48000 kN/m<sup>3</sup>, 54000 kN/m<sup>3</sup>, 60000 kN/m<sup>3</sup>, 66000 kN/m<sup>3</sup>, sampai dengan 72000 kN/m<sup>3</sup> dengan peningkatan setiap 6000 kN/m<sup>3</sup>.

**Pembebanan**

Beban P pada masing-masing pondasi adalah beban maksimum yang dihitung dengan persamaan :  $P = (q_a \times B \times L)$ , dan hasilnya disajikan dalam Tabel 3 dan 4. Beban ini adalah beban batas yang dipikul oleh masing masing pondasi sesuai dengan dimensinya.

**Tabel 3. Beban Maksimum (kN) Pada Pondasi Pelat Tunggal**

$q_a$	TYPE PONDASI					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
50	112,50	200	312,50	450	612,50	800
100	225,00	400	625,00	900	1225,0	1600
150	337,50	600	937,50	1350	1837,5	2400
200	450,00	800	1250,0	1800	2450,0	3200
250	562,50	1000	1562,5	2250	3062,5	4000
300	675,00	1200	1875,0	2700	3675,0	4800
350	787,50	1400	2187,5	3150	4287,5	5600
400	900,00	1600	2500,0	3600	4900,0	6400
450	1012,5	1800	2812,5	4050	5512,5	7200
500	1125,0	2000	3125,0	4500	6125,0	8000
550	1237,5	2200	3437,5	4950	6737,5	8800
600	1350,0	2400	3750,0	5400	7350,0	9600

**Tabel 4. Beban Maksimum (kN) Pada Pondasi Pelat Gabungan**

$q_a$ (kN/m <sup>2</sup> )	TYPE PONDASI				
	F7	F8	F9	F10	F11
50	100	150	200	250	300
100	200	300	400	500	600
150	300	450	600	750	900
200	400	600	800	1000	1200
250	500	750	1000	1250	1500
300	600	900	1200	1500	1800
350	700	1050	1400	1750	2100
400	800	1200	1600	2000	2400
450	900	1350	1800	2250	2700
500	1000	1500	2000	2500	3000
550	1100	1650	2200	2750	3300
600	1200	1800	2400	3000	3600

**Variasi Tinjauan**

Jumlah variasi pondasi adalah 11 buah, sedangkan jumlah variasi  $ks$  adalah 12 buah. Sehingga bila jumlah variasi pondasi dikombinasikan dengan jumlah variasi  $ks$ , maka akan ada variasi tinjauan sejumlah 132 buah, seperti tertera dalam Tabel 5 dan 6.

**Tabel 5. Variasi Tinjauan Pondasi Pelat Tunggal**

$ks$	F1	F2	F3	F4	F5	F6
6000	1	2	3	4	5	6
12000	7	8	9	10	11	12
18000	13	14	15	16	17	18
24000	19	20	21	22	23	24
30000	25	26	27	28	29	30
36000	31	32	33	34	35	36
42000	37	38	39	40	41	42
48000	43	44	45	46	47	48
54000	49	50	51	52	53	54
60000	55	56	57	58	59	60
66000	61	62	63	64	65	66
72000	67	68	69	70	71	72

**Tabel 6. Variasi Tinjauan Pondasi Pelat Gabungan**

$ks$	F7	F8	F9	F10	F11
6000	73	74	75	76	77
12000	78	79	80	81	82
18000	83	84	85	86	87
24000	88	89	90	91	92
30000	93	94	95	96	97
36000	98	99	100	101	102
42000	103	104	105	106	107
48000	108	109	110	111	112
54000	113	114	115	116	117
60000	118	119	120	121	122
66000	123	124	125	126	127
72000	128	129	130	131	132

Dimana: F1 s/d F6 adalah pondasi (1,5 m x 1,5 m) s/d (4 m x 4 m) sedangkan F7 s/d F11 adalah pondasi (1 m x 4 m) s/d (1 m x 12 m)

**Verifikasi Metode Analisis**

Melihat geometri dari pondasi pelat baik untuk pondasi pelat tunggal maupun pondasi pelat gabungan, sebenarnya pondasi dapat dimodel sebagai model 1D, 2D dan 3D. Pada model 1D, pondasi dianalisis sebagai balok satu dimensi, sedangkan pada model 2D pondasi dianalisis secara dua dimensi dengan elemen shell, dan pada model 3D, pondasi dianalisis dengan elemen solid.

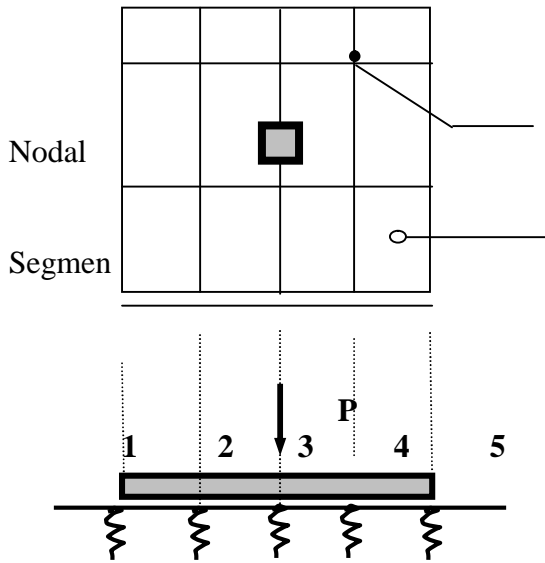
Jika hasil reaksi pegas dari ketiga model di atas dibandingkan, ternyata perbedaannya sangat kecil dan tidak signifikan yaitu maksimum 1,45 %, artinya dengan model apapun pondasi pelat ini dianalisis akan mendapatkan reaksi pegas yang mendekati sama.

Verifikasi model ini dimaksudkan untuk memvalidasi hasil hitungan dengan cara membandingkan hasil yang didapat metode elemen hingga (SAP 2000), dengan metode eksak, dimana pada metode eksak konsep dasar teorinya hanya sebagai balok (1D), Selanjutnya dalam analisis, pondasi dimodel dengan elemen shell (2D).

Perbedaan hasil analisis antara SAP 2000 dengan *software Jinchi Lu* sangat kecil yaitu maksimum 0,4%. Sedangkan dengan metode eksak terdapat selisih yaitu maksimum 4,62%. Dengan demikian analisis dengan program SAP 2000 memuaskan.

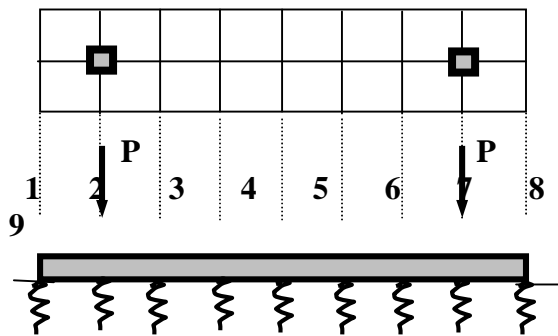
**Pemodelan dalam SAP 2000**

Dalam SAP 2000 pondasi pelat tunggal dan pondasi pelat gabungan dimodel dengan elemen *shell* (2D), dengan pembagian jumlah segmen antara 6 sampai 16 tergantung dari lebar pondasi pada kedua sumbunya. Tanah dimodel sebagai kumpulan pegas yang berdiri sendiri (*spring constant*) yang bekerja pada tiap tiap nodal segmen



$k = k_s \cdot B$

**Gambar 3. Model pondasi pelat tunggal dengan elemen 2D**



$k = k_s \cdot B$

**Gambar 4. Model pondasi pelat gabungan dengan elemen 2D**

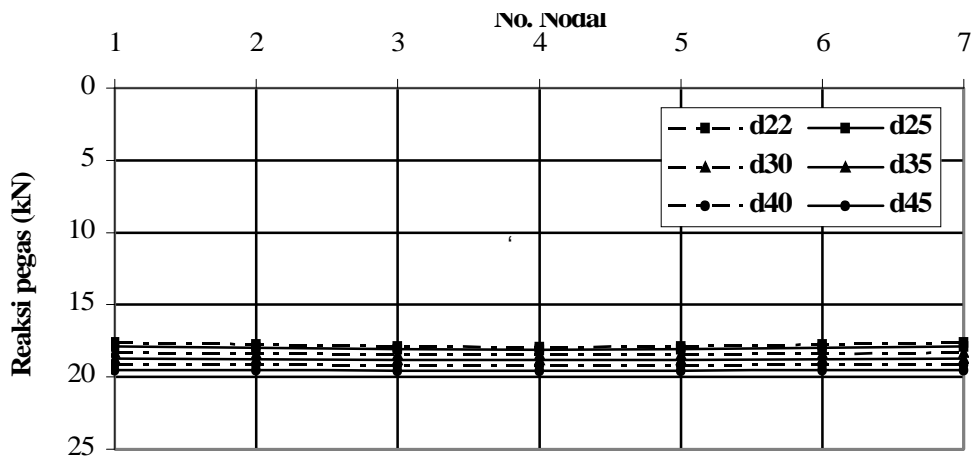
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Distribusi Reaksi Tanah Dasar**

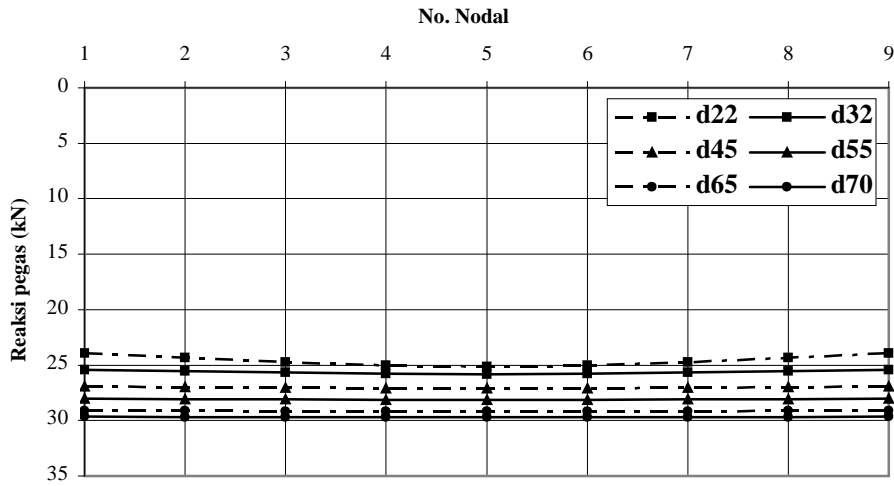
Kurva-kurva reaksi pegas pada pondasi pelat tunggal (Gambar 5 s/d 8) dimana beban bekerja pada titik beratnya mempunyai kecenderungan yang sama yaitu bentuk kurva parabola dimana reaksi pegas maksimum berada ditengah-tengah sedangkan reaksi minimum ada di ujung pondasi.

Perilaku yang sama terjadi juga pada pondasi pelat gabungan (Gambar 9 s/d 12), tetapi letak reaksi maksimum terjadi di ujung dan reaksi minimum di tengah pondasi. Dengan peningkatan tebal pondasi pada setiap pondasi yang ditinjau, menyebabkan reaksi pegas maksimum akan berkurang sedangkan reaksi pegas minimum akan bertambah. Demikian seterusnya sampai reaksi reaksi pegas sepanjang pondasi mendekati sama. Hal ini disebabkan karena letak beban berada 0,5 m dari kedua ujung pondasi.

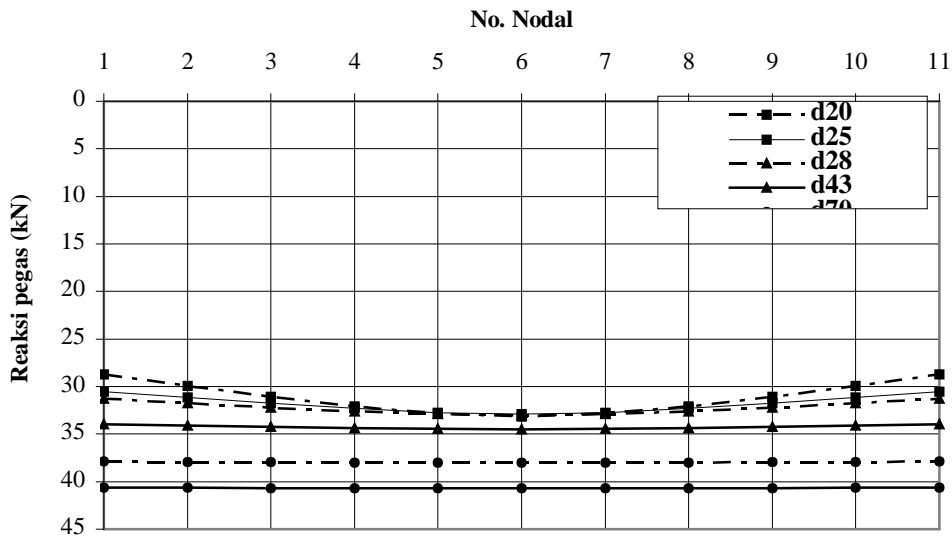
Sehingga kalau dilihat dari kurva keduanya, maka kurva kurva dari pondasi pelat tunggal melengkung ke bawah, sedangkan pada pondasi pelat gabungan kurva kurvanya melengkung ke atas.



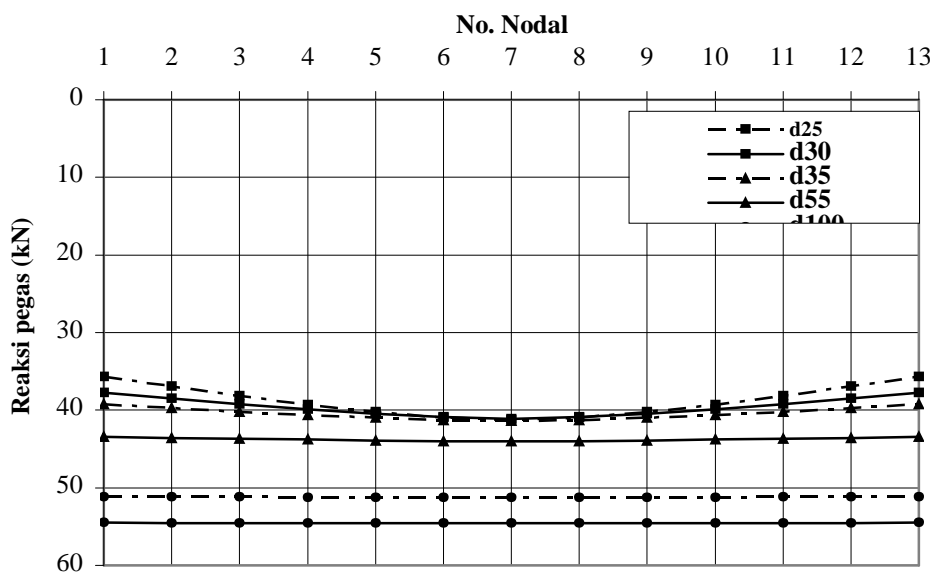
**Gambar 5. Diagram reaksi pegas pondasi 1,5 m x 1,5 m,  $k_s = 6000 \text{ kN/m}^3$**



Gambar 6. Diagram reaksi pegas pondasi 2 m x 2 m,  $k_s = 6000 \text{ kN/m}^3$

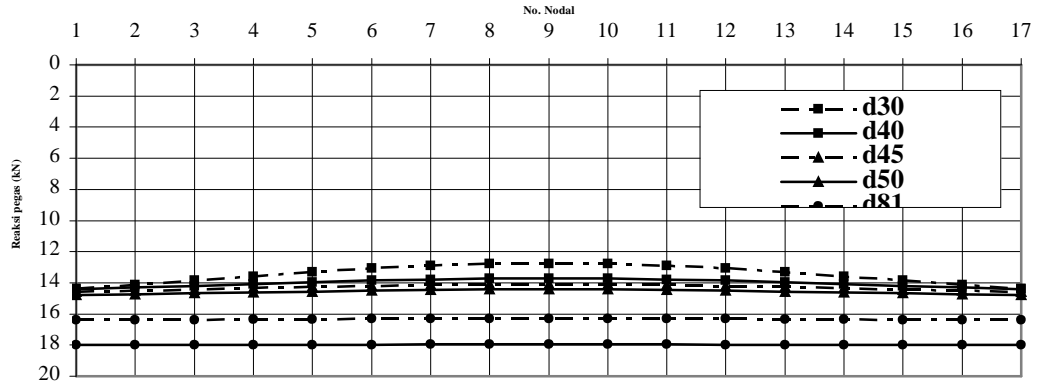


Gambar 7. Diagram reaksi pegas pondasi 2,5 m x 2,5 m,  $k_s = 6000 \text{ kN/m}^3$

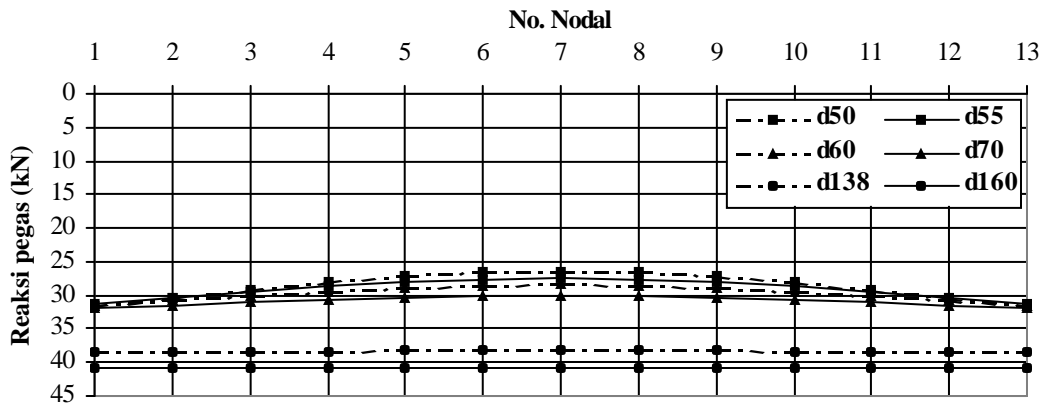


Gambar 8. Diagram reaksi pegas pondasi 3 m x 3 m,  $k_s = 6000 \text{ kN/m}^3$

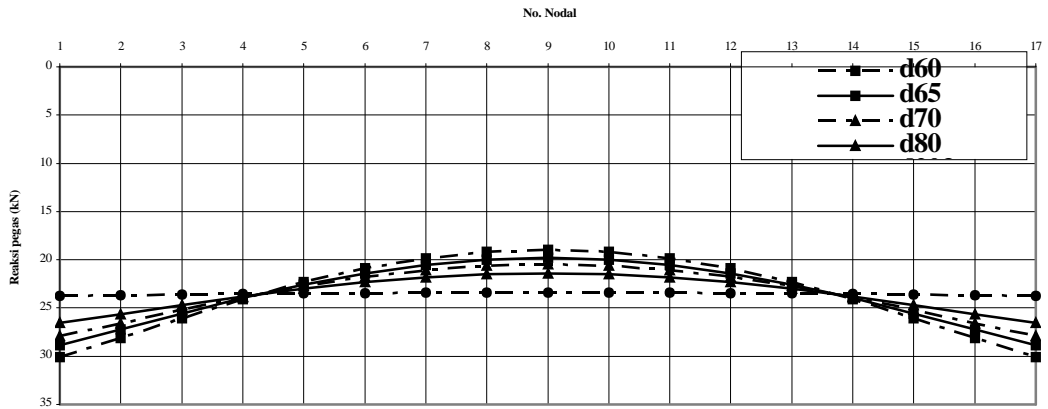




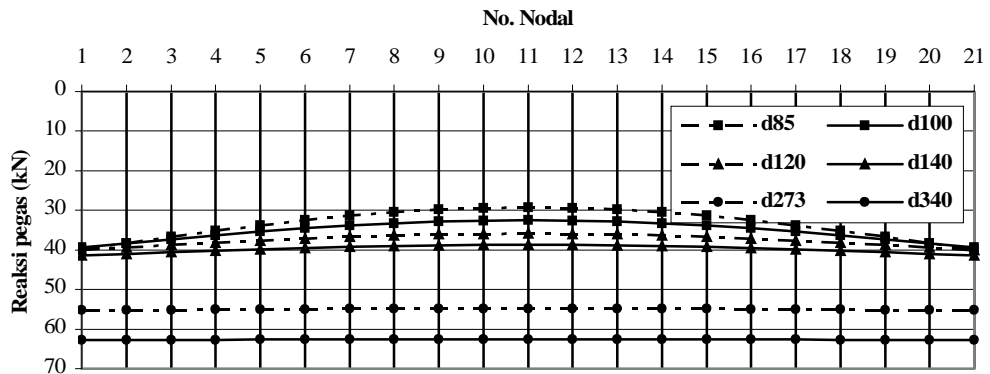
Gambar 9. Diagram reaksi pegas pondasi 1 m x 4 m,  $ks = 6000 \text{ kN/m}^3$



Gambar 10. Diagram reaksi pegas pondasi 1 m x 6 m,  $ks = 6000 \text{ kN/m}^3$



Gambar 11. Diagram reaksi pegas pondasi 1 m x 8 m,  $ks = 6000 \text{ kN/m}^3$



Gambar 12. Diagram reaksi pegas pondasi 1 m x 10 m,  $ks = 6000 \text{ kN/m}^3$

**Tebal Pondasi pada kondisi rigid**

Setelah mengamati 132 kurva distribusi reaksi tanah dasar, maka didapat tebal masing masing pondasi yang ditampilkan dalam Table 7 dan 8.

**Tabel 7. Tebal Pondasi Pelat Tunggal dalam kondisi rigid**

ks (kN/m <sup>3</sup> )	Tebal Pondasi (m)					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
6000	0,22	0,32	0,43	0,55	0,68	0,81
12000	0,28	0,41	0,55	0,69	0,85	1,02
18000	0,32	0,46	0,62	0,79	0,97	1,16
24000	0,35	0,51	0,69	0,87	1,07	1,28
30000	0,38	0,55	0,74	0,94	1,15	1,38
36000	0,40	0,58	0,78	1,00	1,23	1,46
42000	0,42	0,61	0,83	1,05	1,29	1,54
48000	0,44	0,64	0,86	1,10	1,35	1,61
54000	0,46	0,67	0,90	1,14	1,40	1,67
60000	0,47	0,69	0,93	1,18	1,45	1,73
66000	0,49	0,71	0,96	1,22	1,50	1,79
72000	0,50	0,73	0,99	1,26	1,54	1,84

**Tabel 8. Tebal Pondasi Pelat Gabungan dalam kondisi rigid**

ks (kN/m <sup>3</sup> )	Tebal Pondasi (m)					
	F7	F8	F9	F10	F11	F12
6000	0,81	1,38	2,03	2,73	3,48	0,81
12000	1,02	1,74	2,55	3,44	4,38	1,02
18000	1,16	1,99	2,92	3,93	5,01	1,16
24000	1,28	2,19	3,22	4,33	5,52	1,28
30000	1,38	2,36	3,46	4,66	5,94	1,38
36000	1,46	2,51	3,68	4,95	6,32	1,46
42000	1,54	2,64	3,87	5,22	6,65	1,54
48000	1,61	2,76	4,05	5,45	6,95	1,61
54000	1,67	2,87	4,21	5,67	7,23	1,67
60000	1,73	2,97	4,36	5,87	7,49	1,73
66000	1,79	3,07	4,50	6,06	7,73	1,79
72000	1,84	3,16	4,64	6,24	7,96	1,84

**Batasan Pondasi Pelat pada kondisi rigid**

Hubungan ks dengan dimensi pondasi bisa didapat dari Persamaan Karakteristik ( ), yang dinyatakan sebagai

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

Bila Persamaan karakteristik ( ) ini dikalikan dengan panjang (l) pondasi, maka akan didapat suatu besaran yang tidak berdimensi (λl) untuk setiap tipe pondasi pada nilai ks tertentu yang besarnya sama yaitu 0,79 seperti tersaji pada Tabel 9 dan 10. Ini berarti bahwa kondisi rigid tercapai apabila hasil perkalian (λl) dengan (l) sama dengan 0,79.

Sehingga bila (λl) > 0,79 maka pondasi tersebut adalah rigid, sedangkan

apabila (λl) < 0,79, maka pondasi tersebut dikategorikan sebagai pondasi fleksibel.

**Persamaan Pondasi pada Kondisi Rigid**

Berdasarkan hasil analisis didapat bahwa nilai batas pondasi rigid adalah pada besaran λl = 0,79, dimana λl adalah persamaan karakteristik yang tergantung dari momen inersia pondasi (I), modulus elastisitas pondasi (E) dan modulus reaksi tanah dasar (ks). Oleh karena itu parameter-parameter ini sangat berpengaruh dalam menentukan klasifikasi sebuah pondasi yang rigid atau fleksibel.

Tebal pondasi pelat pada kondisi rigid dapat dicari dengan cara menyederhanakan besaran λl = 0,79. Sehingga persamaan umum untuk ketebalan pondasi dalam kondisi rigid adalah:

$$d = 1,975 \cdot \left[ \frac{ks \cdot l^4}{E_c} \right]^{1/3} \tag{3.1}$$

**Tabel 9. Besaran (λl) Pondasi Pelat Tunggal dalam kondisi rigid**

ks (kN/m <sup>3</sup> )	Besaran (λl)					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
6000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
12000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
18000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
24000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
30000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
36000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
42000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
48000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
54000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
60000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
66000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
72000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79

**Tabel 10. Besaran (λl) Pondasi Pelat Gabungan dalam kondisi rigid**

ks (kN/m <sup>3</sup> )	Besaran (λl)					
	F7	F8	F9	F10	F11	F12
6000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
12000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
18000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
24000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
30000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
36000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
42000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
48000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
54000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
60000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
66000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
72000	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79

**Pengaruh dimensi pada kondisi Rigid**

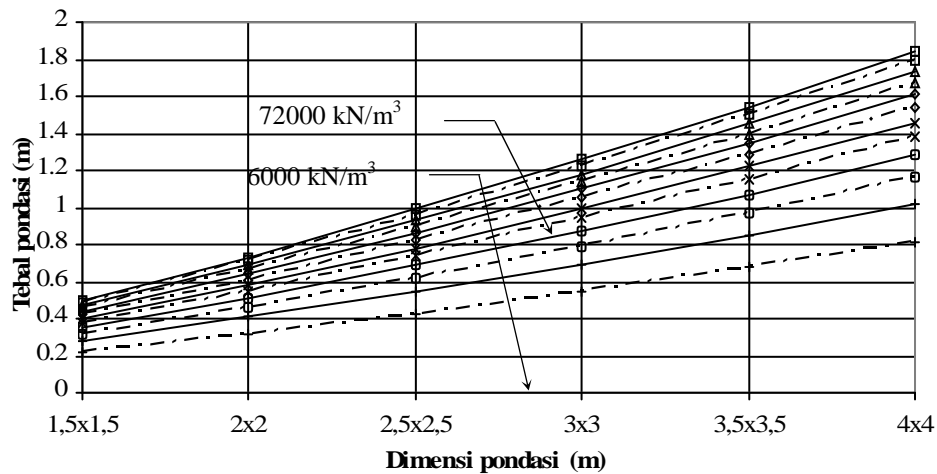
Hubungan dimensi pondasi ( $l$ ) dengan tebalnya pada kondisi rigid baik untuk pondasi pelat tunggal maupun pondasi pelat gabungan ternyata linier, seperti ditampilkan pada Gambar 13 dan 14. Grafik ini juga menunjukkan bahwa pada kondisi rigid, tebal pondasi pelat gabungan 3 s/d 4 kali lebih besar dari tebal pondasi pelat tunggal. Berdasarkan kenyataan ini perlu dipertimbangkan faktor ekonomi dalam pemilihan tipe pondasi sebuah struktur.

dimana posisi beban ada di tengah pondasi (simetris), kurva reaksi pegas yang dihasilkan berbentuk linier dan mendatar (horisontal). Pada saat posisi beban seperti kondisi c dan d (tidak simetris), kurva reaksi pegas yang dihasilkan juga berbentuk garis linier namun miring.

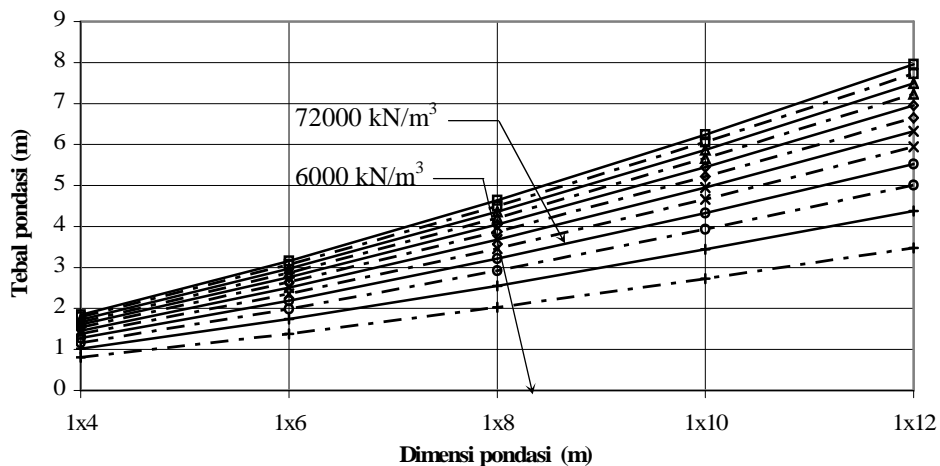
Sudut kemiringan kurva ini tergantung dari posisi beban (eksentrisitas terhadap titik berat pondasi). Semakin besar jarak eksentrisitasnya, semakin besar pula sudut kemiringan kurva reaksi pegasnya. Untuk posisi beban a, dimana bekerja kombinasi beban momen dan P pada titik berat pondasi, kurva reaksi pegas yang dihasilkan juga berbentuk linier dan miring. Arah kemiringan kurva ini tergantung dari arah bekerjanya momen.

**Pengaruh Letak dan Jenis Beban**

Gambar 15 menunjukkan bahwa kurva reaksi pegas dari hasil analisis berbagai posisi beban (a,b,c,d) pada pondasi telapak 4 m x 4 m. Pada kondisi beban b,



**Gambar 13. Diagram hubungan dimensi dengan tebal pondasi pelat tunggal pada kondisi rigid**

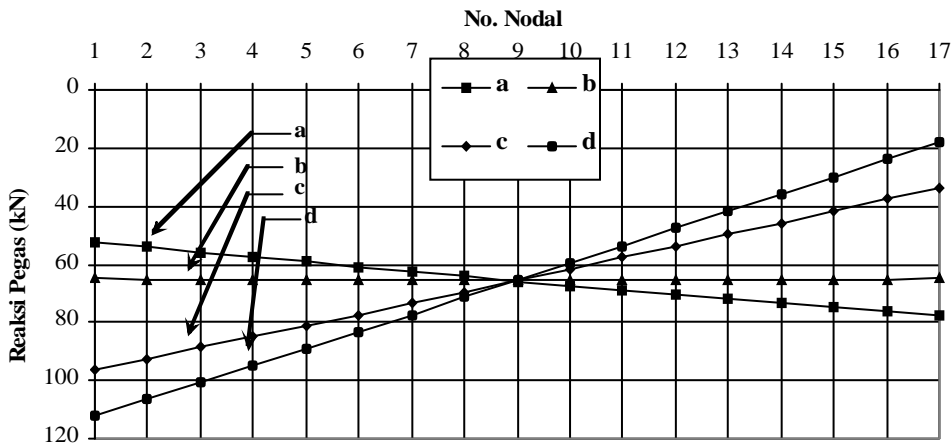


**Gambar 14. Diagram hubungan dimensi dengan tebal pondasi pelat gabungan pada kondisi rigid**

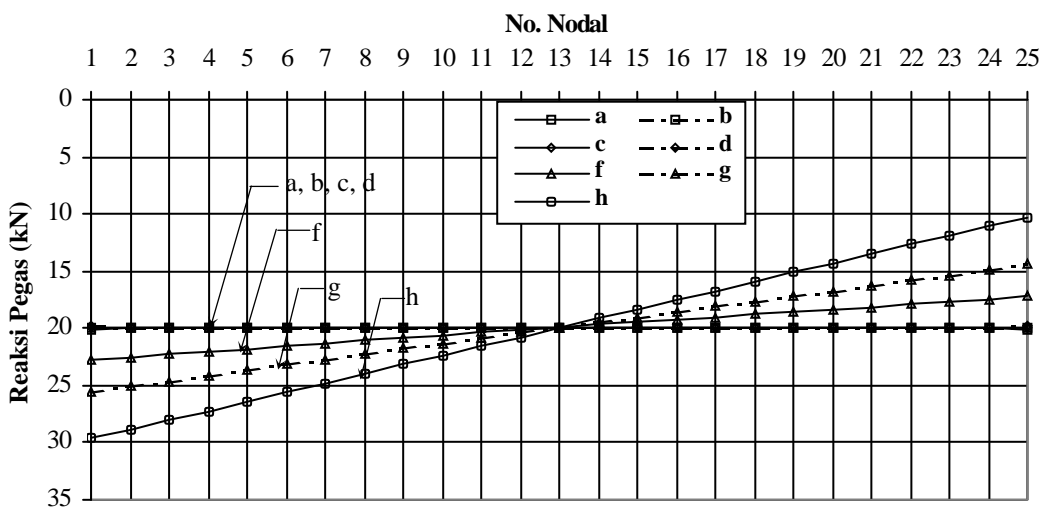
Gambar 16 menunjukkan bahwa pada saat beban  $P = 150 \text{ kN}$  diletakkan secara simetris pada pondasi gabungan  $1 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  (a, b, c, d), ternyata kurva reaksi pegas yang terjadi tetap linier dengan nilai yang hampir sama satu dengan lainnya walaupun lokasi beban dari ujung pondasi berbeda-beda. Hal ini diperlihatkan oleh berimpitnya garis kurva yang dihasilkan untuk kondisi a, b, c dan d tersebut. Bila beban diletakkan tidak simetris (f, g dan h), kurva reaksi pegas yang terjadi juga tetap linier, walaupun tidak lagi horizontal melainkan miring sesuai letak beban atau eksentrisitas beban terhadap titik berat pondasi.

Penomena yang terjadi pada pondasi  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ , juga terjadi pada pondasi ini, yaitu kurva yang dihasilkan baik bebannya simetris maupun tidak tetap berupa garis lurus atau linier. Pada beban simetris akan merupakan linier horizontal dan pada kondisi tidak simetris berupa linier dan miring.

Jadi Gambar 15 dan 16 membuktikan bahwa dalam kondisi rigid, kurva distribusi reaksi pegas dari suatu pondasi pelat selalu linier, baik untuk beban simetris maupun tidak simetris. Kondisi ini sama seperti kondisi dimana metode konvensional selama ini diterapkan.



Gambar 15. Diagram reaksi pegas pondasi  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,  $k_s = 6000 \text{ kN/m}^3$  dengan beban momen



Gambar 16. Diagram reaksi pegas pondasi  $1 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ,  $k_s = 6000 \text{ kN/m}^3$  dengan posisi beban berubah-ubah

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan, dapat diambil beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Batasan kekakuan pondasi pelat di atas tanah elastis dapat dinyatakan dengan besaran tidak berdimensi  $l$ , dengan nilai sebesar 0,79. Dan ketebalan minimum pondasi dalam kondisi rigid dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$d = 1,975 \cdot \left[ \frac{ks \cdot l^4}{E_c} \right]^{1/3}$$

dimana  $ks$  adalah modulus reaksi tanah dasar ( $kN/m^3$ ),  $l$  adalah panjang pondasi ( $m$ ) dan  $E_c$  adalah modulus elastisitas material pondasi ( $kN/m^2$ ).

2. Pondasi kaku terjadi apabila  $l$  lebih kecil dari 0,79 atau ketebalannya lebih besar dari nilai persamaan  $d$ , dan dapat dianalisis dengan metode konvensional, sebaliknya pondasi dengan  $l$  lebih besar dari 0,79 atau ketebalannya lebih kecil dari nilai persamaan  $d$ , dikategorikan sebagai pondasi fleksibel, dan analisisnya sebaiknya memakai metode fleksibel untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.
3. Dengan luasan dan nilai modulus reaksi tanah dasar yang sama, tebal pondasi yang menyebabkan kondisi rigid pada pondasi pelat gabungan berkisar antara 3 sampai 4 kali dari ketebalan pondasi pelat tunggal.
4. Dalam kondisi rigid, posisi beban yang bekerja pada pondasi baik terletak simetris maupun tidak atau beban yang bekerja merupakan beban kombinasi (terpusat dan momen) tidak mempengaruhi distribusi linier dari reaksi tanah dasar yang terjadi di bawah suatu pondasi.

### Saran

Dalam perancangan suatu pondasi besaran  $l = 0,79$  atau formula tebal pondasi ( $d$ ) pada simpulan no 1 dapat dipakai untuk mengetahui klasifikasi suatu

pondasi. Hal ini perlu dilakukan untuk menentukan metode yang paling sesuai dipakai menganalisis pondasi tersebut sehingga mendapatkan hasil rancangan pondasi yang akurat dan mendekati kenyataan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu sehingga tulisan ini termuat pada Jurnal ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bengt B.B. 2004. *Special Footing And Beams On Elastic Foundation*, Geo Texts & Publications, Webforum Europe AB.
- Bowles E.J. 1983. *Foundation Analysis and Design*, 3<sup>rd</sup> Edition”, terjemahan. Pantur Silaban, Penerbit, Erlangga, Jl Kramat IV No.11, Jakarta Pusat.
- CSI. 2002. *SAP 2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design – Analysis Reference Manual*, Berkeley, California, USA.
- Elgamal. 2002. *Flexible Beam On Elastic Foundation*, Department of Structural Engineering, University Of California San Diego.
- Hetenyi, M. 1946. *Beams On Elastic Foundation, Theory with Application in the fields of Civil and Mechanical Engineering*, John Wiley & Sons Canada, Limited Manufactured in The United States of America.
- He, L. and Lu, J. 2000. *Basic of Beam On Elastic Foundation*, Department of Structural Engineering University of California, San Diego.
- Selvadurai, 1979. *Elastic Analysis of Soil Foundation Interaction*, development in Geotechnical Engineering Vol.17, Elsevier Scientific Publishing Company.