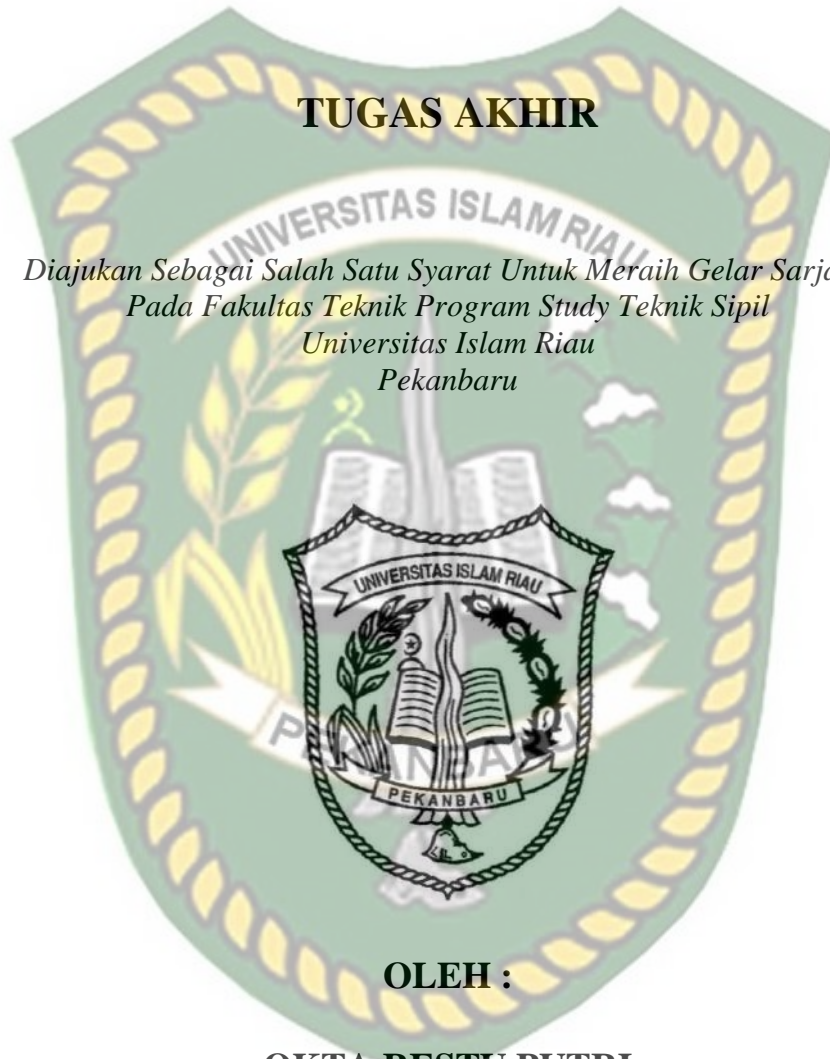


**ANALISIS VARIASI FAKTOR AMAN TAMBAHAN  
MODULUS REAKSI TANAH DASAR SISTEM PELAT  
TERPAKU TIANG PIPA BETON TUNGGAL PADA  
LEMPUNG LUNAK**

**TUGAS AKHIR**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Meraih Gelar Sarjana  
Pada Fakultas Teknik Program Study Teknik Sipil  
Universitas Islam Riau  
Pekanbaru*



**OLEH :**

**OKTA RESTU PUTRI**  
**133110088**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ISLAM RIAU  
PEKANBARU  
2019**

# HALAMAN PERSETUJUAN

## TUGAS AKHIR

**ANALISIS VARIASI FAKTOR AMAN TAMBAHAN MODULUS REAKSI  
TANAH DASAR SISTEM PELAT TERPAKU TIANG PIPA BETON  
TUNGGAL PADA LEMPUNG LUNAK**

**DISUSUN OLEH**

**OKTA RESTU PUTRI  
NPM. 133110088**

**Diperiksa dan Disetujui oleh :**

**Dr. Anas Puri, ST., MT**  
Pembimbing

.....  
Tanggal :

**Roza Mildawati, ST., MT**  
Pembimbing

.....  
Tanggal :

# HALAMAN PENGESAHAN

## TUGAS AKHIR

**ANALISIS VARIASI FAKTOR AMAN TAMBAHAN MODULUS REAKSI  
TANAH DASAR SISTEM PELAT TERPAKU TIANG PIPA BETON  
TUNGGAL PADA LEMPUNG LUNAK**

**DISUSUN OLEH :**

**OKTA RESTU PUTRI  
NPM. 133110088**

**Telah Disetujui Didepan Dewan Penguji Tanggal 31 Oktober 2019  
Dan Dinyatakan Telah Memenuhi Syarat Untuk Diterima**

**SUSUNAN DEWAN PENGUJI**

**Dr. Anas Puri, ST., MT  
Dosen Pembimbing**

**Roza Mildawati, ST., MT  
Dosen Pembimbing**

**Dr. Elizar, ST., MT  
Dosen Penguji**

**Harmiyati, ST., M.si  
Dosen Penguji**

**Pekanbaru, Desember 2019  
UNIVERSITAS ISLAM RIAU  
FAKULTAS TEKNIK**

**Ir. H. Abd Kudus Zaini, MT.,MS.,Tr.  
Dekan**

## HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan :

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah di ajukan untuk mendapatkan gelar akademik (strata satu) di Universitas Islam Riau.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan tidak kebenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dan sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Pekanbaru, Desember 2019



Okta Restu Putri  
133110088

## KATA PENGANTAR

*Assalamu 'alaikum warahmatullahi wa barakatuh.*

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Variasi Faktor Aman Tambahan Modulus Reaksi Tanah Dasar Sistem Pelat Terpaku Tiang Pipa Beton Tunggal Pada Lempung Lunak**”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.

Alasan Penulis dalam mengangkat judul ini adalah untuk mengetahui penerapan rumusan perkerasan Sistem Pelat Terpaku menggunakan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen dalam perhitungan lendutan dengan variasi faktor aman pada Metode Hardiyatmo Modifikasi, serta mengetahui perbandingan perencanaan tanpa memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b=0$ ) dengan perencanaan memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b \neq 0$ ), yang diharapkan mendapatkan nilai faktor aman yang memiliki lendutan paling kecil berdasarkan lendutan toleransi ( $\delta_a = 5$  mm), sehingga dapat dijadikan rumusan yang tepat dalam perencanaan perkerasan sistem Pelat Terpaku dengan menggunakan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu Penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang sifatnya membangun, guna kesempurnaan penulisan Tugas Akhir dengan tema sejenis di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkannya.

*Wassalamu 'alaikum warahmatullahi wa barakatuh.*

Pekanbaru, 28 Oktober 2019

OKTA RESTU PUTRI

Penulis

## UCAPAN TERIMAKASIH

*Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh,*

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Dan dengan kerendahan hati penulis ingin menyampaikan dan mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dengan memberikan dorongan dan dukungan yang tak terhingga terutama kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Syafrinaldi, SH., MCL, selaku Rektor Universitas Islam Riau
2. Bapak Ir. H. Abdul Kudus Zaini, MT., MS., Tr, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.
3. Ibu Dr. Kurnia Hastuti, ST., MT, selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.
4. Bapak M. Ariyon, ST., MT, selaku Wakil Dekan II Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.
5. Bapak Ir. Syawaldi, M.Sc, selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.
6. Ibu Dr. Elizar, ST., MT, selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil sekaligus sebagai Dosen Penguji.
7. Bapak Firman Syarif, ST., M.Eng, selaku Sekretaris Program Studi Teknik Sipil.
8. Bapak Dr. Anas Puri, ST., MT, selaku Dosen Pembimbing I.
9. Ibu Roza Mildawati, ST., MT, selaku Dosen Pembimbing II.
10. Ibu Harmiyati, ST., M.Si. selaku Dosen Penguji.
11. Seluruh Staf Pengajar/Dosen Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.
12. Seluruh Karyawan/Karyawati Tata Usaha Fakultas Teknik Universitas Islam Riau.

13. Kedua orang tua tersayang, Bapak M. Ali Ramli (alm), Ibu Ratna Resti (almh) dan Umi Syarifah Hidayah yang selalu memberikan doa terbaik serta dukungan dan semangat yang tiada henti.
14. yang tersayang abang Taufan Afryady Putra dan Kakak Ipar Heviyanti S.Pd, dan sebagai pengganti Bapak dan Ibu yang telah memberikan doa serta dukungan dan semangat yang tiada henti serta Abang-abang dan adik tersayang, Fahrurani Putra, AL-Azmi Putra, dan Rara Mella Mareta, kakak ipar terbaik Atnasari dan Nissa Khumaira yang telah memberikan doa dan motivasi serta menjadi penyemangat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
15. Keponakan Tersayang, AL-Naufal putra, Zahratul Najwa, Alisha Naila Fahrurani, Lala Laila Fahrurani, Alifa Putri Azmi dan Aisyah Fahrurani yang menjadi penyemangat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
16. Sahabat-sahabatku Ferly Oktavia S.T, Mairia Oktaviani, Nurul Hafizha, Abdul Aziz Nawawi S.T, Elda Jayanti S.Pd, Apri Sandra S.T yang menjadi penyemangat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
17. Teman-Teman seperjuangan kelas C angkatan 13 dan rekan-rekan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Riau seluruh angkatan dan khususnya angkatan 2013 yang telah memberikan dorongan, kritik dan saran serta ide-ide dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, serta pihak-pihak lain yang tidak dapat Penulis sebutkan satu persatu.

Terima kasih atas segala bantuannya, semoga penelitian ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca serta segala amal baik kita mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT.

*Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh*

Pekanbaru, 28 Oktober 2019

OKTA RESTU PUTRI

133110088

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>UCAPAN TERIMAKASIH.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR NOTASI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Batasan Masalah .....	4
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Umum .....	5
2.2 Penelitian terdahulu .....	5
2.3 Keaslian Penelitian.....	8
<b>BAB III. LANDASAN TEORI.....</b>	<b>10</b>
3.1 Sistem Pelat Terpaku .....	10
3.1.1 Modulus Reaksi <i>Subgrade</i> Ekuivalen .....	11
3.1.2 Tambahan Modulus Reaksi <i>Subgrade</i> Ekuivalen( $\Delta k$ ) .....	13
3.2 <i>Structural Analysis Program</i> (SAP) 2000 .....	20
3.2.1 Metode Elemen Hingga .....	20
3.2.2 Metode Elemen Hingga Pelat Lentur diatas Tanah .....	



Dasar .....	20
3.2.3 Perilaku Material Pelat .....	23
3.2.4 Elemen Pegas ( <i>Spring Element</i> ) .....	24
<b>BAB IV. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>26</b>
4.1 Objek Penelitian .....	26
4.2 Tahapan Penelitian .....	26
4.3 Cara Analisa .....	29
<b>BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>34</b>
5.1 Deskripsi Umum .....	34
5.2 Data Acuan Penelitian .....	34
5.2.1 Klasifikasi Tanah dan Beton .....	36
5.2.2 Data dan Besaran Perhitungan .....	37
5.2.3 Pembebanan .....	38
5.3 Pengaruh Variasi Faktor Aman Untuk Tiang Diameter 30 cm dengan $L_p = 1,5$ m.....	39
5.3.1 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b = 0$ .....	40
5.3.2 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap Hasil Lendutan dan Momen .....	40
5.3.3 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$ .....	42
5.3.4 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap hasil lendutan dan momen .....	42
5.4 Pengaruh Variasi Diameter untuk Panjang Tiang 1,5 m.....	44
5.4.1 Pengaruh Variasi Diameter Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b = 0$ .....	44
5.4.2 Pengaruh Variasi Diameter Tiang Terhadap Lendutan dan momen .....	45

5.4.3	Pengaruh Variasi Diameter Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$ .....	48
5.4.4	Pengaruh Variasi Diameter Terhadap Lendutan dan Momen $Q_b \neq 0$ .....	49
5.4.5	Perbandingan Lendutan dan Momen untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$ .....	51
5.5	Pengaruh Variasi Panjang Tiang untuk Diameter 30 cm .....	54
5.5.1	Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ Saat $Q_b=0$ .....	54
5.5.2	Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap Lendutan dan Momen ( $Q_b \neq 0$ ) .....	55
5.5.3	Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$ .....	58
5.5.4	Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap Lendutan dan Momen $Q_b \neq 0$ .....	59
5.5.5	Perbandingan Lendutan dan Momen untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$ .....	61
<b>BAB VI. PENUTUP .....</b>		<b>64</b>
6.1	Kesimpulan .....	64
6.2	Saran .....	65
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>66</b>
<b>LAMPIRAN</b>		

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 3.1</b> Tampak atas perkerasan beton Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2008).....	10
<b>Gambar 3.2</b> Tampak samping perkerasan beton Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2008) .....	11
<b>Gambar 3.3</b> Tampang Sistem Pelat Terpaku dibuat monolit dirancang untuk beban berat dan tanah-dasar bermasalah (Hardiyatmo, 2008) .....	11
<b>Gambar 3.4</b> Kenaikan modulus reaksi tanah dasar oleh pengaruh dukungan tiang (Hardiyatmo, 2011).....	14
<b>Gambar 3.5</b> Faktor adhesi untuk tiang pancang pada tanah lempung (McClelland, 1974 dalam Agustin, 2017) .....	17
<b>Gambar 3.6</b> Grafik faktor daya dukung $N_c$ (Skempton, 1956 dalam Agustin,2017) .....	19
<b>Gambar 3.7</b> Permukaan pelat tipis lentur (Suhendro, 2000) .....	21
<b>Gambar 3.8</b> Keseimbangan gaya dalam <i>differential element dx dy</i> (Suhendro, 2000) .....	22
<b>Gambar 3.9</b> Macam penempatan elemen .....	24
<b>Gambar 3.10</b> Contoh elemen cangkang yang dipasang pegas dukungan vertikal ( $k_v$ ), lateral ( $k_h$ ) dan gesek ( $k_t$ ) (Ramadhoni, 2008 dalam Puri, 2015).....	25
<b>Gambar 4.1</b> Perkerasan Pelat Terpaku Tiang Tunggal.....	26
<b>Gambar 4.2</b> Bagan alir penelitian .....	28
<b>Gambar 4.3</b> Tampilan input data program SAP2000 .....	31
<b>Gambar 4.4</b> Tampilan input data program SAP2000 .....	33
<b>Gambar 5.1</b> Perkerasan Sistem Pelat Terpaku tiang tunggal (Puri, 2017).....	37
<b>Gambar 5.2</b> Hubungan $P$ - $\delta$ Pelat Terpaku tiang tunggal (Puri, 2017) .....	37
<b>Gambar 5.3</b> Tiang pipa beton diameter 30 cm $L_p= 1,5$ m.....	39
<b>Gambar 5.4</b> Hubungan $P$ - $\delta$ dengan variasi faktor aman untuk $Q_b = 0$ .....	41

<b>Gambar 5.5</b>	Hubungan $P-M$ dengan variasi faktor aman untuk $Q_b = 0$ .....	41
<b>Gambar 5.6</b>	Hubungan $P-\delta$ dengan variasi faktor aman untuk $Q_b \neq 0$ .....	43
<b>Gambar 5.7</b>	Hubungan $P-M$ dengan variasi faktor aman untuk $Q_b \neq 0$ .....	43
<b>Gambar 5.8</b>	Tiang pipa beton Lp 1,5 m .....	45
<b>Gambar 5.9</b>	Hubungan antara $P-\delta$ dengan variasi faktor aman dan diameter untuk $Q_b = 0$ .....	46
<b>Gambar 5.10</b>	Hubungan antara $P-M$ dengan variasi faktor aman dan diameter untuk $Q_b=0$ .....	47
<b>Gambar 5.11</b>	Hubungan antara $P-\delta$ dengan variasi faktor aman dan diameter untuk $Q_b \neq 0$ .....	49
<b>Gambar 5.12</b>	Hubungan antara $P-M$ dengan variasi faktor aman dan diameter untuk $Q_b \neq 0$ .....	50
<b>Gambar 5.13</b>	Hubungan antara $P-\delta$ dengan variasi faktor aman dan diameter pada Lp 1,5 m untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$ .....	51
<b>Gambar 5.14</b>	Hubungan antara $P-\delta$ dengan variasi faktor aman dan diameter pada Lp 1,5 m untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$ .....	53
<b>Gambar 5.15</b>	Sketsa tiang pipa beton diameter 30 cm .....	54
<b>Gambar 5.16</b>	Hubungan $P-\delta$ terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada tiang diameter 30 untuk $Q_b = 0$ .....	56
<b>Gambar 5.17</b>	Hubungan $P-M$ terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada tiang diameter 30 untuk $Q_b = 0$ .....	57
<b>Gambar 5.18</b>	Hubungan $P-\delta$ terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada tiang diameter 30 untuk $Q_b \neq 0$ .....	59
<b>Gambar 5.19</b>	Hubungan $P-M$ terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada tiang diameter 30 untuk $Q_b \neq 0$ .....	60
<b>Gambar 5.20</b>	: Hubungan $P-\delta$ terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada tiang diameter 30 untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$ .....	61
<b>Gambar 5.11</b>	Hubungan $P-\delta$ terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada tiang diameter 30 untuk $Q_b = 0$ dan $Q_b \neq 0$ .....	63

**Gambar A.1** Sketsa model pelat terpaku tiang pipa beton tunggal .....

A.1

**Gambar A.2** Faktor adhesi untuk tiang pancang pada tanah lempung (Mc Clelland).....

A.2

**Gambar A.3** Sketsa model pelat terpaku tiang pipa beton tunggal

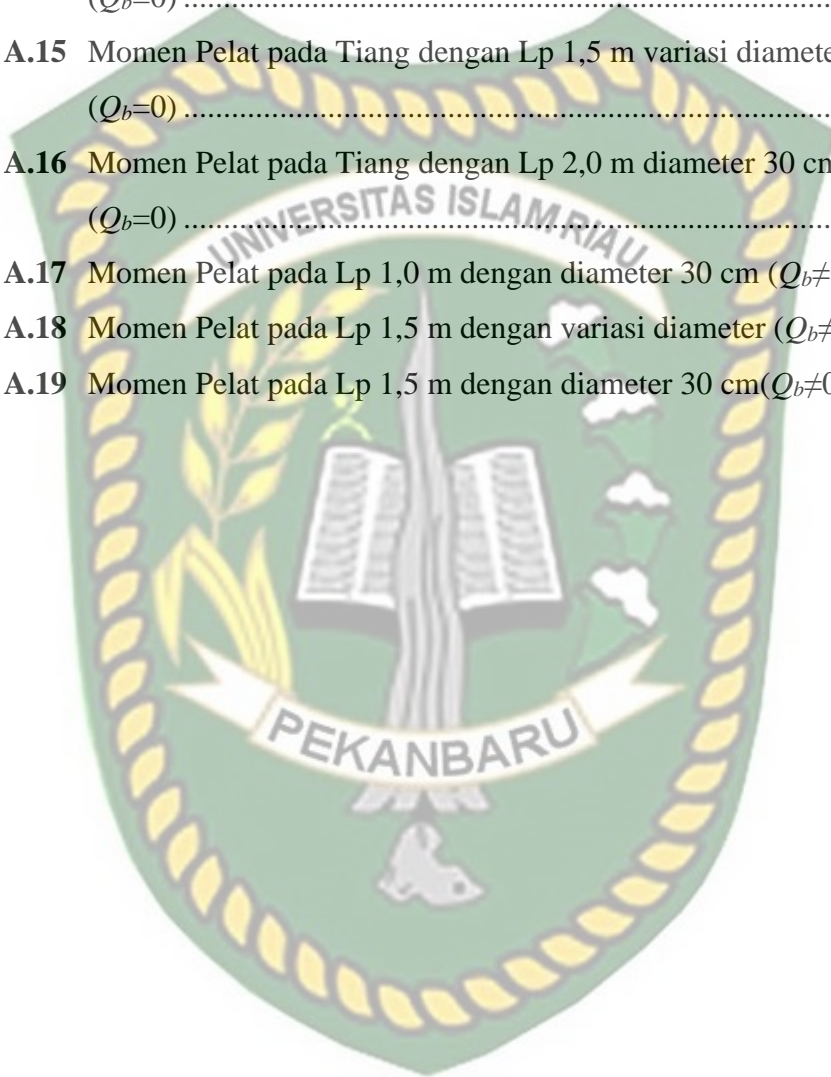
A.3



## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 5.1</b> Sifat-sifat Lempung dan Beton (Puri, 2017).....	36
<b>Tabel 5.2</b> Data dan besaran perhitungan modulus $\Delta k$ dan $k'$ .....	37
<b>Tabel 5.3</b> Nilai $A_b$ dan $A_s$ dari variasi dimensi tiang mini.....	38
<b>Tabel 5.4</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b=0$ .....	40
<b>Tabel 5.5</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$ .....	42
<b>Tabel 5.6</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ dengan variasi diameter untuk $Q_b=0$ .....	45
<b>Tabel 5.7</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ dengan variasi diameter untuk $Q_b \neq 0$ .....	48
<b>Tabel 5.8</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ dengan variasi panjang untuk $Q_b=0$ .....	55
<b>Tabel 5.9</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ dengan variasi panjang untuk $Q_b \neq 0$ .....	55
<b>Tabel A.1</b> Variasi diameter tiang pipa beton tunggal .....	A.1
<b>Tabel A.2</b> Variasi panjang tiang pipa beton tunggal .....	A.1
<b>Tabel A.3</b> Nilai $A_s$ dari variasi diameter dan panjang tiang pipa beton tunggal .....	A.3
<b>Tabel A.4</b> Nilai ( $\delta_a = 5 \text{ mm}$ ) pada pengujian pembebanan sentris (Puri, 2015) .....	A.3
<b>Tabel A.5</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b=0$ .....	A.10
<b>Tabel A.6</b> Luas ujung tiang ( $\text{m}^2$ ) .....	A.11
<b>Tabel A.7</b> Nilai $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$ .....	A.18
<b>Tabel A.8</b> <i>Input</i> nilai modulus reaksi <i>subgrade</i> ekuivalen ( $k'$ ) .....	A.19
<b>Tabel A.9</b> Lendutan pelat pada tiang dengan $L_p$ 1m diameter 30 cm ( $Q_b=0$ ) .....	A.19
<b>Tabel A.10</b> Lenduta pelat pada tiang dengan $L_p$ 1,5 m ( $Q_b=0$ ).....	A.22
<b>Tabel A.11</b> Lendutan pelat pada tiang dengan $L_p$ 2,0 m diameter 30 cm ( $Q_b=0$ ) .....	A.22
<b>Tabel A.12</b> Lendutan pelat pada tiang dengan $L_p$ 1 m diameter 30 cm ( $Q_b \neq 0$ ) .....	A.23

<b>Tabel A.13</b>	Lendutan pelat pada tiang dan Lp 1,5 m dengan variasi tiang ( $Q_b \neq 0$ ) .....	A.24
<b>Tabel A.14</b>	Momen Pelat pada Tiang dengan Lp 1,0 m diameter 30 cm ( $Q_b = 0$ ) .....	A.26
<b>Tabel A.15</b>	Momen Pelat pada Tiang dengan Lp 1,5 m variasi diameter 30 cm ( $Q_b = 0$ ) .....	A.27
<b>Tabel A.16</b>	Momen Pelat pada Tiang dengan Lp 2,0 m diameter 30 cm ( $Q_b = 0$ ) .....	A.29
<b>Tabel A.17</b>	Momen Pelat pada Lp 1,0 m dengan diameter 30 cm ( $Q_b \neq 0$ ) ....	A.30
<b>Tabel A.18</b>	Momen Pelat pada Lp 1,5 m dengan variasi diameter ( $Q_b \neq 0$ )....	A.30
<b>Tabel A.19</b>	Momen Pelat pada Lp 1,5 m dengan diameter 30 cm ( $Q_b \neq 0$ ) .....	A.32



## DAFTAR NOTASI

$\alpha$	= Faktor perpindahan tiang
$\alpha_d$	= Faktor adhesi (non-dimensi)
$A_b$	= Luas ujung tiang ( $m^2$ )
$A_{ps}$	= Luas zona pelat yang didukung satu tiang= $s^2$
$A_s$	= Luas selimut tiang ( $m^2$ )
AASHTO	= <i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
A-7-6	= Klasifikasi kelompok tanah berdasarkan AASHTO
$B$	= Lebar pelat (m)
$B$	= Fleksibilitas balok
SAP 2000	= ( <i>Structural Analysis Program 2000</i> )
$c$	= Kohesi (kN/m)
CAM	= Cakar Ayam Modifikasi
CH	= Lempung plastisitas tinggi ( <i>clay High Plasticity</i> )
Cm	= Sentimeter
$C_u$	= <i>Undrained</i> kohesi ( $kN/m^2$ )
$D$	= Diameter tiang (m)
$\Delta k$	= Tambahan modulus reaksi <i>subgrade</i> karena adanya tiang( $kN/m^3$ )
$\delta$	= Lendutan yang terjadi (m)
$\delta_0$	= Perpindahan relatif antara tanah dan tiang (m)
$\delta_a$	= Lendutan izin maksimum atau lendutan toleransi ( $\delta_a= 5 \text{ mm}$ )
$\delta_p$	= Perpindahan kepala tiang (m)
$E$	= Kekakuan pelat ( $kN/m^2$ )
$E_c$	= Modulus elastisitas beton (Mpa)
$E_{oed}$	= Parameter alternatif yang dihitung secara otomatis oleh SAP2000 berdasarkan input $E$ dan $\nu$
$f_c'$	= Mutu beton (Mpa)
$f_b$	= Tahanan ujung satuan tiang ( $kN/m^2$ )
$f_s$	= Tahanan gesek satuan tiang ( $kN/m^2$ )



$G$	= modulus geser
$I$	= Momen inersia ( $m^4$ )
$K$	= modulus bulk
kN	= Kilonewton
kN/m	= Kilonewton per meter
kN/m <sup>2</sup>	= Kilonewton per meter persegi
kN/m <sup>3</sup>	= Kilonewton per meter kubik
kPa	= Kilopascal
$K_d$	= Koefisien tekanan tanah lateral tanah disekitar tiang
$k$	= Modulus reaksi <i>subgrade</i> dari tanah ( $kN/m^3$ )
$k'$	= Reaksi <i>subgrade</i> ekuivalen pelat terpaku ( $kN/m^3$ )
$k_{(B \times B)}$	= Modulus reaksi tanah dasar pelat beban $B \times B$ ( $kN/m^3$ )
$k_s$	= Koefisien tanah dasar
$k_t$	= Modulus gesek tiang ( $kN/m^3$ )
$k_v$	= Koefisien reaksi tanah dasar vertikal ( $kN/m^3$ )
$k_{v 0,3}$	= Modulus reaksi tanah dasar pelat beban 0,3 m x 0,3 m ( $kN/m^3$ )
$L$	= Panjang Pelat (m)
$L_p$	= Panjang tiang (m)
m	= mmeter
m <sup>2</sup>	= meter persegi
mm	= Milimeter
Mpa	= Megapascal
$N_c$	= Faktor kapasitas dukung (diambil $N_c = 9$ ) (Skempton, 1959)
$p_0$	= Tekanan <i>overburden</i> efektif rata-rata sepanjang tiang ( $kN/m^2$ )
$Q = P$	= Beban terpusat (kN)
$q$	= Tekanan tanah
$Q_b$	= Tahanan ujung ultimit tiang (kN)
$Q_s$	= Tahanan gesek ultimit tiang (kN)
$Q_u$	= Kapasitas dukung ultimit tiang (kN)
$Q_{b=0}$	= Mengabaikan tahanan ujung tiang
$Q_{b \neq 0}$	= Memperhitungkan tahanan ujung tiang

$s$	= Ukuran Penampang (m)
$SF$	= Faktor aman
$T$	= Tebal pelat
USCS	= <i>Unified Soil Classification System</i>
$w$	= Berat sendiri (kN/m)
$w=\delta$	= deformasi
$W_p$	= Berat sendiri tiang
$\phi_d$	= Sudut gesek antara tanah-tiang ( $^{\circ}$ )
$[K]$	= Matriks kekakuan dtruktur pada sumbu global
$\{U\}$	= <i>Vector displacement</i>
$\{F\}$	= <i>Vector gaya</i>



## DAFTAR LAMPIRAN

### LAMPIRAN A. PERHITUNGAN

A.1	Koreksi Modulus Reaksi <i>Subgrade</i> dari Uji Pelat	.....
	.....	Beban
	.....	A.1
A.2	Tambahan Modulus Reaksi <i>Subgrade</i> karena Adanya Tiang Tanpa Memperhitungkan Tahanan Ujung Tiang ( $Q_b=0$ ).....	A.2
A.2.1	Berdasarkan Lendutan Maksimum Sebagai Lendutan Izin ( $\delta a= 5\text{mm}$ ).....	A-3
A.3	Tambahan Modulus Reaksi <i>Subgrade</i> karena Adanya Tiang Tanpa Memperhitungkan Tahanan Ujung Tiang ( $Q_b=0$ ).....	A-11
A.3.1	Berdasarkan Lendutan Izin Maksimum Sebagai Lendutan Izin.....	A.11
A.4	Data-Data yang dibutuhkan dalam Analisa SAP2000 ( <i>Structural Analysis Program</i> ).....	A.18
A.5	Hasil Perhitungan Lendutan dan Momen dengan Menggunakan SAP2000.....	A.19
A.5.1	Hasil Perhitungan Lendutan.....	A.19
A.5.2	Hasil Perhitungan Momen.....	A.26

### LAMPIRAN B. DATA SEKUNDER

### LAMPIRAN C. SURAT-SURAT

# ANALISIS VARIASI FAKTOR AMAN TAMBAHAN MODULUS REAKSI TANAH DASAR SISTEM PELAT TERPAKU TIANG PIPA BETON TUNGGAL PADA LEMPUNG LUNAK

OKTA RESTU PUTRI

133110088

## Abstrak

Perkerasan Sistem Pelat Terpaku merupakan interaksi antara pelat beton-tiang-tanah menjadikan pelat lebih kaku, tiang yang dipasang di bawah pelat berfungsi sebagai pengaku pelat sehingga beban yang bekerja diatas pelat dapat disebar lebih luas ke tanah lunak, sehingga diharapkan perkerasan memberikan kemampuan yang baik serta terhindar dari penurunan yang tidak seragam akibat beban yang bekerja di sepanjang perkerasan, Sistem Pelat Terpaku bukanlah metode perbaikan tanah melainkan salah satu alternatif metode meningkatkan kinerja perkerasan kaku pada tanah dasar lunak. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi faktor aman terhadap lendutan dan momen pada pelat dan pengaruh tahanan ujung tiang.

Metode yang digunakan dalam menghitung modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) yaitu metode Hardiyatmo Modifikasi, dimana nilai faktor aman divariasikan (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) serta akan dilihat pengaruh apabila tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ). Dalam menganalisis lendutan digunakan metode elemen hingga dengan bantuan program komputer *SAP 2000* versi 12. Hasil lendutan berdasarkan lendutan toleransi ( $\delta_a=5\text{mm}$ ).

Hasil analisis menunjukkan bahwa pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki lendutan yang lebih kecil dibandingkan dengan faktor ama lainnya. Analisis lendutan pada tiang untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) memiliki lendutan kecil berdasarkan lendutan toleransi ( $\delta_a=5\text{mm}$ ) sehingga pada desain sistem pelat terpaku lebih baik dengan memperhitungkan tahanan ujung tiang karena desain akan menjadi lebih aman.

**Kata kunci** : Faktor Aman, modulus reaksi *subgrade* ekuivalen, sistem pelat terpaku, lempung lunak, tiang pipa beton tunggal.

**ANALISYS OF VARIOUS OF SAFETY FACTORS OF SUBGRADE  
REACTION OF SINGLE CONCRETE PIPE POLES NAILED-SLAB  
SYSYTEM ON SOFT CLAY**

**OKTA RESTU PUTRI**  
**133110088**

**Abstract**

*The Nailed-slab Pavement System is interaction of plate-pole-soil makes the plate more stiff, a pole mounted under the plate function as plate stiffener so that the load can be spread more broadly to soft clay, so expect pavement gives a good ability and avoid from differential settlement due to the burden across the pavement, Nailed-slab system was not method of soils repairment but one of alternative methode to increaese the performance of pavement on the soft clay. The research did to know effect of safety factor variation to deflection and momen on the plate and effect resistance of pole end.*

*The method in use in counting equivalen subgrade modulus reaction ( $k'$ ) that is Hardiyatmo Modification Method, where the value of variated safety factor (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) and would be seen the effect if pole end resistance ignored ( $Q_b=0$ ) and if pole end resistance count ( $Q_b \neq 0$ ). Deflection analisys using the finite element methode with the help of the computer program "SAP2000 version 12". The results deflections based on deflection of tolerance ( $\delta_a = 5 \text{ mm}$ )*

*Analisis result shows that on the use of safety factor 1,0 have smaller deflections than with other safety factors. Deflection analisys on poles for pole end resistance count ( $Q_b \neq 0$ ) have smaller deflections based on deflection of tolerance ( $\delta_a = 5 \text{ mm}$ ). So on the desain Nailed-slab system more kind taking into account the resistance of the pole because the desain will be safer.*

*Key Words : Safety Factor, equivalen subgrade reaction modulus, Nailed Slab System, soft clay , single concrete pipe poles.*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Wilayah di Indonesia banyak ditemui daerah yang memiliki tanah-dasar (*subgrade*) yang terletak pada tanah yang relatif lunak atau tanah ekspansif (Hardiyatmo, 2012). Tanah mempunyai peranan penting dalam pembangunan dan merupakan salah satu unsur yang berpengaruh pada struktur yang akan di bangun di atasnya baik itu struktur bangunan maupun struktur perkerasan. Jika tanah merupakan hal yang penting untuk diperhatikan dalam membangun suatu struktur, maka dibutuhkan parameter sehingga didapatkan rancangan yang tepat dan sesuai dengan kondisi yang ada.

Pada umumnya struktur perkerasan kaku digunakan pada tanah dasar lunak, perkerasan kaku yang berada di atas tanah lunak atau tanah ekspansif lebih cenderung mengalami deformasi yang berlebihan akibat beban kendaraan berat. Menurut Hardiyatmo (2012), metode perancangan perkerasan jalan yang telah ada, umumnya mengansumsi bahwa tanah dasar dalam keadaan stabil, sehingga tebal komponen struktur perkerasan hanya didasarkan pada daya dukung tanah dasar yang dinyatakan oleh nilai CBR atau modulus reaksi *subgrade* vertikal. Perencanaan menjadi terganggu apabila tanah dasar mengalami vibrasi yang berlebihan akibat beban siklik lalu-lintas (karena tanah dasar yang lunak), selain itu kembang-susut yang di alami tanah lunak akibat berubahnya musim juga berpengaruh pada ketahanan perkerasan, dan masalah lain diakibatkan oleh muatan kendaraan yang berlebihan yang menyebabkan perkerasan jalan menjadi lebih cepat rusak sebelum batas akhir pelayanannya.

Lapis perkerasan kaku menumpu langsung pada tanah dasar lunak atau di atas lapis pondasi jalan. Namun tanah lunak dibawahnya cenderung mengalami penurunan yang tidak seragam (*differential settlement*) yang disebabkan distribusi beban yang tidak merata sepanjang perkerasan atau penurunan tidak seragam akibat ketidakhomogenan tanah. Perkerasan jalan tidak hanya menerima beban

siklik oleh kendaraan, namun juga menerima beban akibat temperatur yang membuat perkerasan jalan mengalami momen lentur bolak balik (Puri, 2015).

Sebagai alternatif penyelesaian masalah tersebut, Hardiyatmo (2008) mengusulkan perkerasan beton dengan sistem pelat terpaku (*Nailed Slab System*). Metode Hardiyatmo Modifikasi (2012) merupakan salah satu metode yang digunakan dalam menentukan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen, metode ini merupakan metode modifikasi dari metode Hardiyatmo (2011). Sistem pelat terpaku (*nailed-slab System*) merupakan salah satu alternatif solusi untuk mengatasi permasalahan konstruksi jalan yang melalui tanah lunak (Puri, 2013).

Puri (2017) telah melakukan analisis variasi faktor aman pada modulus reaksi *subgrade* ekuivalen untuk model skala penuh Pelat Terpaku satu baris tiang dengan pembebanan tekan sentris. Sistem tersebut berada pada media tanah lempung lunak. Analisis pada penerapan variasi faktor aman untuk pelat terpaku tiang pipa beton tunggal belum dilakukan, sehingga memungkinkan diperolehnya perbedaan pada hasil analisis.

Pada penelitian ini akan diterapkan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dengan pendekatan variasi faktor aman pada nilai tambahan modulus reaksi *subgrade* ( $\Delta k$ ) untuk Sistem Pelat Terpaku Tiang Tunggal pada lempung lunak. Nilai modulus *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) merupakan hasil penambahan nilai modulus reaksi *subgrade* ( $k$ ) dan tambahan modulus reaksi *subgrade* ( $\Delta k$ ) akibat adanya tiang, nilai ini digunakan dalam perencanaan Sistem Pelat Terpaku. Tambahan nilai modulus tanah dasar di bawah pelat karena instalasi tiang dinyatakan sebagai kontribusi perlawanan tiang (Puri, dkk, 2012).

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Dari variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) manakah lendutan hasil perhitungan yang paling kecil berdasarkan lendutan maksimal 5 mm?
2. Bagaimana pengaruh variasi faktor aman terhadap tahanan ujung tiang?

3. Bagaimana pengaruh variasi faktor aman dan variasi dimensi tiang tunggal (diameter 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm dan panjang tiang 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m) terhadap perilaku lendutan dan gaya dalam pada pelat terpaku?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah di atas, adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) terhadap lendutan dan momen pada pelat.
2. Mengetahui pengaruh variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) terhadap tahanan ujung tiang.
3. Mengetahui pengaruh variasi dimensi tiang (diameter 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm dan panjang tiang 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m) terhadap lendutan dan momen pada pelat terpaku.

### 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian ini diantaranya sebagai berikut :

1. Mendapat informasi tentang perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku tiang pipa beton tunggal pada tanah lunak.
2. Mendapat pengetahuan lebih dari penerapan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen dalam perhitungan lendutan Perkerasan Sistem Pelat Terpaku dengan variasi faktor aman.
3. Diharapkan mendapat rumusan faktor aman pada modulus reaksi *subgrade* ekuivalen yang dapat diterapkan dalam perkerasan Sistem Pelat Terpaku dari pengamatan lendutan.
4. Mengenalkan dan mengaplikasikan program *SAP* 2000 dalam bidang geoteknik untuk menganalisis dalam perhitungan lendutan perkerasan sistem Pelat Terpaku menggunakan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen



### 1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi lebih terarah dan tidak terlalu luas, maka penulis memberikan batasan pada penelitian sebagai berikut :

1. Objek dan data yang digunakan diambil dari hasil uji skala penuh Sistem Pelat Terpaku pada lempung lunak (Puri, 2017) khusus untuk Pelat Terpaku tiang tunggal.
2. Variasi faktor aman yang digunakan ( 1,0; 2,0; 2,5; 3,0).
3. Lendutan izin maksimum 5 mm.
4. Tidak menghitung/membahas biaya konstruksi.
5. Perhitungan lendutan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program komputer *SAP 2000 (Structural Analysis Program 2000)*.
6. Pengaruh *SF* terhadap lendutan dan momen pada pelat.
7. Menggunakan tiang bulat/tiang pipa beton dengan variasi diameter 30 cm, 40 cm, 50 cm 60 cm dan variasi panjang tiang 1 m; 1,5 m; 2 m.
8. Menggunakan pelat dengan tebal 15 cm.
9. Hubungan pelat dan tiang dianggap monolit.
10. Meninjau pengaruh untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ).
11. Beban yang digunakan mengikuti dari penelitian sebelumnya (Puri, 2017).

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Umum

Tinjauan pustaka merupakan peninjauan kembali (*review of related literature*). Sesuai dengan arti tersebut suatu tinjauan pustaka berfungsi sebagai peninjauan kembali pustaka (laporan penelitian dan sebagainya) tentang masalah yang berkaitan tidak terlalu harus tepat identik dengan bidang permasalahan yang di hadapi, termasuk pula yang sering dan berkala (*collateral*).

Dalam penulisan tugas akhir ini peneliti mengambil beberapa referensi dari penelitian-penelitian terdahulu sebagai pedoman dalam penelitian ini. Referensi yang digunakan berupa disertasi dan jurnal-jurnal yang berhubungan dengan penelitian ini.

#### 2.2. Penelitian Terdahulu

Puri (2015), "*Perilaku Sistem Pelat Terpaku Pada tanah Lunak*". Pada penelitian ini mengkaji perilaku Sistem Pelat Terpaku pada lempung lunak akibat pembebanan pada pelat, sehingga dapat diketahui bagaimana kontribusi tiang-tiang dalam meningkatkan kekakuan Sistem Pelat Terpaku. Pelat Terpaku model skala penuh memperhatikan perilaku lendutan berbentuk mangkok. Hal ini mengindikasikan bahwa semua tiang memberi respon yang sama dalam 3D. Tiang-tiang memobilisasi kapasitas dukung tekan dan juga berfungsi sebagai angkur mencegah pelat terjungkit pada bagian yang menerima jungkit. Sistem ini memiliki ketahanan terhadap vibrasi, dimana tiang-tiang memberikan respon yang baik, terlihat pada setiap repetisi beban dikembalikan ke nol maka defleksi semua titik akan kembali ke nol lagi. Peningkatan jumlah baris, jarak, dan panjang tiang, serta pelat penutup tepi, meningkatkan kekakuan sistem yang tercermin pada peningkatan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen. Persamaan dan

kurva faktor perpindahan yang diusulkan untuk penentuan tambahan modulus reaksi tanah dasar dapat digunakan. Kinerja sistem ini menjanjikan untuk diaplikasikan ke lapangan.

Puri, dkk (2013), "*Penerapan Metode Analisis Lendutan Pelat Terpaku pada Model Skala Penuh dan Uji Pembebanan*". Sistem Pelat Terpaku bukanlah metode perbaikan tanah melainkan salah satu alternatif metode meningkatkan kinerja perkerasan kaku pada tanah lunak. Tiang-tiang yang dipasang di bawah pelat berfungsi sebagai pengaku pelat sehingga beban dapat disebar lebih luas ke seluruh permukaan perkerasan. Selain itu tiang juga berfungsi sebagai angkur yang akan membuat pelat tetap kontak langsung dengan tanah sehingga *pumping* dapat dihindari dan durabilitas perkerasan menjadi lebih panjang. Pada makalah ini disajikan perhitungan semi-manual pada perencanaan skala penuh pelat terpaku ukuran 6,0 m x 3,6 m x 0,15 m dengan 15 tiang dan selanjutnya divalidasikan dengan hasil uji pembebanan. Untuk menghitung lendutan pelat digunakan teori balok di atas fondasi elastis BoEF (*Beam of Elastic Foundation*) dengan menggunakan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ). Pada penelitian ini ada dua tinjauan yaitu tinjauan 1 baris tiang dimana lebar pelat sama dengan jarak antar tiang dan tinjauan 3 baris tiang sesuai dengan rencana untuk 3 baris tiang. Hasil hitungan lendutan ini dibandingkan dengan hitungan metode elemen hingga pengamatan. Dapat disimpulkan bahwa metode penentuan tambahan modulus reaksi *subgrade* dan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen dapat digunakan untuk perencanaan Pelat Terpaku dengan hasil desain pada zona aman, lebih praktis dalam penggunaannya dan tidak memakan banyak waktu

Diana (2015), "*uji Skala Kecil Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Dasar Ekspansif*", pada penelitian ini membahas perilaku Sistem Pelat Terpaku pada tanahdasar ekspansif dengan model skala kecil pada kolam uji di laboratorium. Jika di asumsikan lebar jalan 7 m, maka potongan melintang prototipe pelat Sistem Pelat Terpaku menjadi 70 cm x 20 cm. kolam uji berukuran 7 m x 3,50 m x 1 m. Ukuran model pelat yang digunakan adalah 250 cm x 70 cm x 2 cm, untuk menggambarkan jalan dengan lebar 70 cm, dengan arah memanjang jalan 250 cm dan tebal perkerasan 2 cm. Model tiang dengan diameter 20 cm, menjadi 2 cm,

dan panjang tiang 150 cm sampai 200 cm, dimodelkan dengan variasi panjang tiang 15 cm, 20 cm, dan 25 cm. Pengamatan yang dilakukan berupa *displacement* pelat yang terjadi akibat pembasahan (kondisi tanah dasar mengembang). Uji pembebanan dilakukan sebelum dan setelah pengembangan tanah, pembebanan diposisi ditengah pelat, uji pelat terpaku terhadap pembebanan luar dilakukan dengan menggunakan Plaxis. Sistem Pelat terpaku memberikan kontribusi yang baik terhadap perkerasan yaitu pelat dengan tiang mampu meningkatkan daya dukung tanah dan mereduksi lendutan akibat beban luar. Maka dapat disimpulkan bahwa Sistem Pelat Terpaku ini dapat digunakan sebagai alternatif solusi dalam permasalahan perkerasan jalan di atas tanah dasar ekspansif.

Agustin (2017) "*Perhitungan Lendutan Pelat Menggunakan Nilai Modulus Reaksi Subgrade Ekuivalen Metode Hardiyatmo Modifikasi*". Salah satu solusi mengatasi masalah perkerasan jalan pada tanah lunak atau ekspansif yaitu dengan perkerasan sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM) cakar yang digunakan adalah silinder yang terbuat dari baja, dalam perencanaannya digunakan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen. Pada penelitian ini diterapkan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen untuk menghitung lendutan sistem CAM. Metode yang digunakan dalam menghitung modulus reaksi *subgrade* ekuivalen yaitu metode Hardiyatmo Modifikasi dimana nilai faktor aman divariasikan (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0) serta akan dilihat jika tahanan ujung cakar diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ). Hasil lendutan perhitungan kemudian divalidasi dengan lendutan pengamatan di lapangan penelitian terdahulu (Setiawan, 2015). Dalam menghitung lendutan digunakan metode BoEF dengan bantuan program "BoEF.xls" Program Version 1.4. Hasil analisis menunjukkan rata-rata penggunaan faktor aman 1,0 memiliki pola lendutan yang lebih mendekati lendutan pengamatan (Setiawan, 2015) dan hasil penggunaan faktor aman minimal jika diterapkan pada perkerasan CAM sedikit berbeda dengan penggunaan faktor aman untuk Pelat Terpaku yaitu  $SF = 2,5$ . Jadi memperhitungkan tahanan ujung cakar dalam modulus reaksi *subgrade* ekuivalen perkerasan sistem CAM dapat mereduksi lendutan.

Oktavia (2019) “*Analisis Variasi Faktor Aman Modulus Reaksi Tanah Dasar Sistem Pelat Terpaku Tiang Mini Beton Masif Tunggal Pada Lempung Lunak*”. Perhitungan lendutan menggunakan nilai modulus *subgrade* ekuivalen. Dimensi struktur pelat terpaku mengacu pada penelitian Puri, (2017). Metode yang digunakan dalam analisis perhitungan adalah Metode Hardiyatmo Modifikasi dengan menggunakan faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) dan variasi ukuran penampang tiang (20 cm x 20 cm, 25 cm x 25 cm, 28 cm x 28 cm, 32 cm x 32 cm). Kemudian analisis lendutan dan momen menggunakan metode BoEF (*Beam of Elastic Foundation*) dengan bantuan program komputer “*BoEF.xls*” version 1.4. hasil dari analisis menunjukkan bahwa penggunaan faktor aman mampu mempengaruhi lendutan hitungan, lendutan akan meningkat dengan meningkatnya pula nilai faktor aman, sedangkan dimensi tiang mempengaruhi lendutanyang terjado karena semakin besar dimensi tiang maka lendutan yang dihasilkan aka semakin kecil.

### 2.3. Keaslian Penelitian

Adapun perbedaan anatara penelitian ini dengan penelitian terdahulu adalah pada penelitian ini merupakan penerapan nilai tambahan modulus *subgrade* ekuivalen dalam perhitungan lendutan perkerasan sistem Pelat Terpaku tiang pipa beton tunggal pada lempung lunak. Analisa lendutan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Methode*) dengan bantuan program komputer SAP 2000 version 12 sebagai analisis pendekatan, serta dalam penelitian ini perhitungan tambahan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen akan divariasikan faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) dengan tebal pelat perkerasan 15 cm, variasi dimensi tiang terhadap lendutan dan gaya dalam pada pelat terpaku untuk nilai tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ).

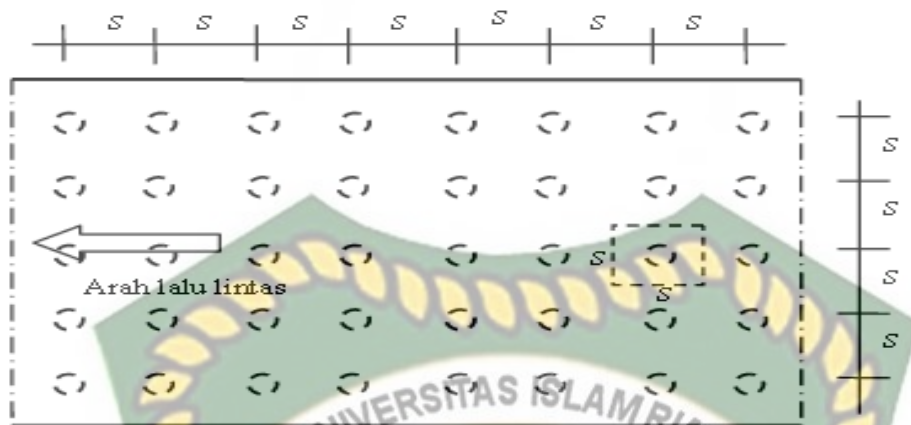
## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Sistem Pelat Terpaku

Sistem Pelat Terpaku (*Nailed Slab System*) yang ditemukan oleh Prof. Dr. Ir. Hary Christady Hardiyatmo, M. Eng.,DEA (2008) merupakan salah satu alternatif solusi untuk mengatasi permasalahan jalan yang mempunyai tanah dasar lunak, merupakan suatu perkerasan beton bertulang dengan tebal antara 12 - 25 cm, yang didukung oleh tiang-tiang mini (panjang 150 - 200 cm dan diameter 15 – 20 cm). Tiang-Tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan. Interaksi antara pelat beton-tiang-tanah di sekitarnya menciptakan suatu perkerasan yang lebih kaku, yang lebih tahan terhadap deformasi tanah.

Sistem Pelat Terpaku cocok digunakan untuk perkerasan kaku yang tanah dasarnya dipengaruhi oleh penurunan tidak seragam karena interaksi tanah-tiang-pelat membuat pelat lebih kaku sehingga mengurangi terjadinya beda penurunan perkerasan (menciptakan permukaan beton yang selalu rata) (Hardiyatmo, 2014). Perlu digaris bawahi sistem Pelat Terpaku bukanlah metode perbaikan tanah melainkan salah satu alternatif metode meningkatkan kinerja perkerasan kaku pada tanah lunak.



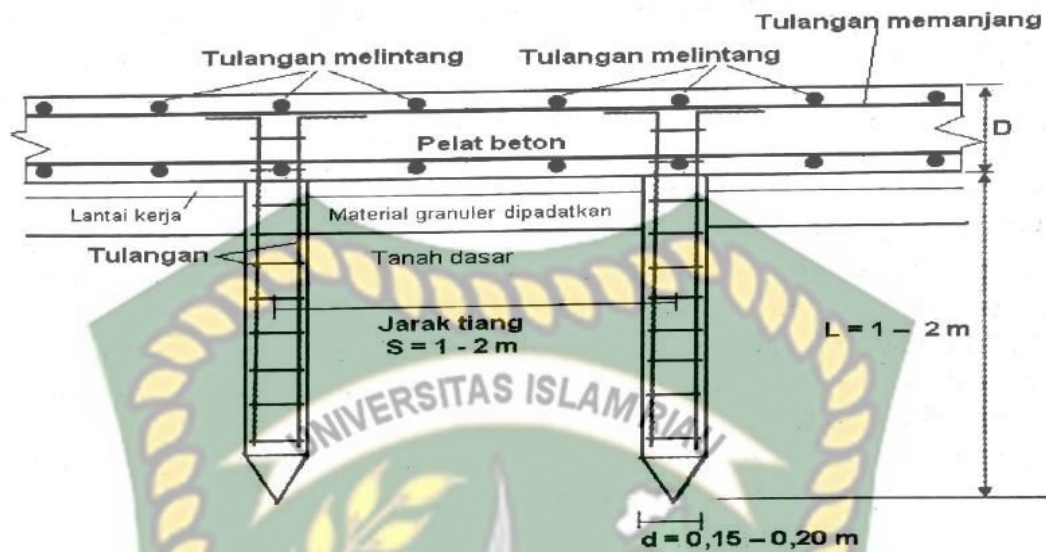
Gambar 3.1 Tampak atas perkerasan beton sistem Pelat Terpaku

(Hadiyatmo, 2008)



Gambar 3.2 Tampak samping perkerasan beton sistem Pelat Terpaku

(Hadiyatmo, 2008)



**Gambar 3.3** Tampang Sistem Pelat Terpaku dibuat monolit dirancang untuk beban berat dan tanah-dasar bermasalah (Hardiyatmo, 2008)

Fungsi tiang-tiang dalam Sistem Pelat Terpaku, berguna untuk menaikkan daya dukung tanah-dasar, juga menjaga agar pelat beton tetap dalam kontak yang baik dengan lapis pondasi bawah.

### 3.1.1 Modulus Reaksi *Subgrade* Ekuivalen ( $k'$ )

Modulus Reaksi *Subgrade* Ekuivalen merupakan cara analisis yang biasa digunakan pada perkerasan sistem pelat terpaku, untuk perancangan tebal perkerasan kaku berdasarkan uji tiang tunggal, metode analisis lendutan pelat fleksibel menggunakan modulus reaksi *subgrade* dan metode penentuan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen yang didasarkan pada uji tiang tunggal telah diusulkan oleh Hardiyatmo (2008, 2009). Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen adalah modulus reaksi akibat adanya tiang-tiang beserta pelat. Nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) diperoleh dengan menjumlahkan nilai modulus reaksi *subgrade* tanah ( $k$ ) dan nilai tambahan dari modulus reaksi dari tiang tunggal ( $\Delta k$ ). Hardiyatmo (2011) mengusulkan metode penentuan tambahan modulus  $\Delta k$ . Puri,



dkk, (2012b) menyederhanakan metode yang diusulkan oleh Hardiyatmo tersebut dengan mempertimbangkan penurunan izin dari perkerasan.

Istilah modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) digunakan untuk membedakan modulus reaksi *subgrade* klasik (yaitu dari uji beban pelat standar) dan modulus *subgrade* pelat yang sudah dipengaruhi oleh dimensi pelat yang lebih lebar dan perlawanan kelompok tiang yang mendukung pelat. Pada sistem pelat terpaku, pendekatan penentuan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) didefinisikan sebagai modulus reaksi *subgrade* yang memperhatikan kontribusi tiang dalam menahan gesekan perpindahan vertikal pelat ditentukan sebagai berikut (Hardiyatmo, 2011; Dewi, 2009; Puri, et.al., 2011b, 2012a dalam Puri, dkk, 2013):

$$k' = k + \Delta k \quad (3.1)$$

dengan :

$k'$  = modulus reaksi *subgrade* ekuivalen pelat terpaku ( $\text{kN/m}^3$ )

$k$  = modulus reaksi *subgrade* dari tanah ( $\text{kN/m}^3$ )

$\Delta k$  = tambahan modulus reaksi *subgrade* karena adanya tiang ( $\text{kN/m}^3$ )

Modulus reaksi *subgrade* dari uji beban pelat ( $k$ ) biasanya menggunakan pelat lingkaran dan mesti dikoreksi terhadap ukuran dan bentuk pelat dari pelat terpaku (Puri, dkk, 2012). Koreksi ukuran dan bentuk pelat mengacu pada metode Das, (2011 dalam Puri, 2015) seperti pada persamaan berikut:

Koreksi terhadap ukuran pelat dinyatakan sebagai:

$$k_v = k_{0,3} \left[ \frac{0,3}{B} \right] \quad (3.2)$$

Dikarenakan pelat yang digunakan berbentuk persegi maka koreksi terhadap bentuk pelat dinyatakan sebagai:

$$k_v = \frac{k(BXB) \left( 1 + \frac{0,5B}{L} \right)}{1,5} \quad (3.3)$$

Dengan :

- $k$  = modulus reaksi tanah dasar dengan lebar  $B$  (kN/m<sup>3</sup>)  
 $k_{0,3}$  = modulus reaksi tanah dasar pelat beban 0,3 m x 0,3 m (kN/m<sup>3</sup>)  
 $B$  = lebar pelat (m)  
 $k_{(B \times B)}$  =  $k_{0,3} \left[ \frac{0,3}{B} \right]$  = modulus reaksi tanah dasar pelat beban  $B \times B$  (kN/m<sup>3</sup>)  
 $L$  = panjang pelat (m)

### 3.1.2 Tambahan Modulus Reaksi *Subgrade* Ekivalen ( $\Delta k$ )

Menurut Hardiyatmo (2011), tambahan kekuatan tanah oleh tiang bergantung pada tahanan tiang yang termobilisasi. Kapasitas dukung ultimit tiang dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p \quad (3.4)$$

Dengan :

- $Q_u$  = kapasitas dukung ultimit tiang (kN)  
 $Q_b$  = tahanan ujung ultimit tiang (kN)  
 $Q_s$  = tahanan gesek ultimit tiang (kN)  
 $W_p$  = berat sendiri tiang (kN)

Menurut Hardiyatmo (2011), karena diameter tiang yang digunakan untuk mendukung pelat beton relatif kecil dan ketika sistem bertumpu pada tanah lunak, maka dapat dianggap tahanan ujung ultimit  $Q_b=0$  seperti pada Gambar 3.2. Daya dukung ultimit tiang kemudian menjadi:

$$Q_u = Q_s \quad (3.5)$$

Dengan:

- $Q_u$  = kapasitas dukung ultimit (kN)  
 $Q_s$  = tahanan gesek ultimit tiang (kN)

Tahanan gesek tiang dinyatakan sebagai berikut :

$$Q_s = A_s f_s \quad (3.6)$$

dengan :

$A_s =$  luas selimut tiang ( $m^2$ )

$f_s =$  tahanan gesek satuan tiang ( $kN/m^2$ )



**Gambar 3.4** Kenaikan modulus reaksi tanah-dasar oleh pengaruh dukungan tiang, (a) denah, (b) Tampak samping, (Hardiyatmo, 2011)

Tahanan gesek satuan tiang dapat dinyatakan oleh persamaan klasik (Puri,et.al.,2012a)

$$f_s = a_d c_u + p'_o K_d t g \theta_d \quad (3.7)$$

Khusus untuk tahanan gesek satuan tiang pada lempung jenuh dinyatakan dengan (Puri,et.al.,2012a)

$$f_s = a_d c_u \quad (3.8)$$

dengan :

$A_d =$  faktor adhesi (non-dimensi)

$c_u$  = undrained kohesi ( $\text{kN/m}^2$ )

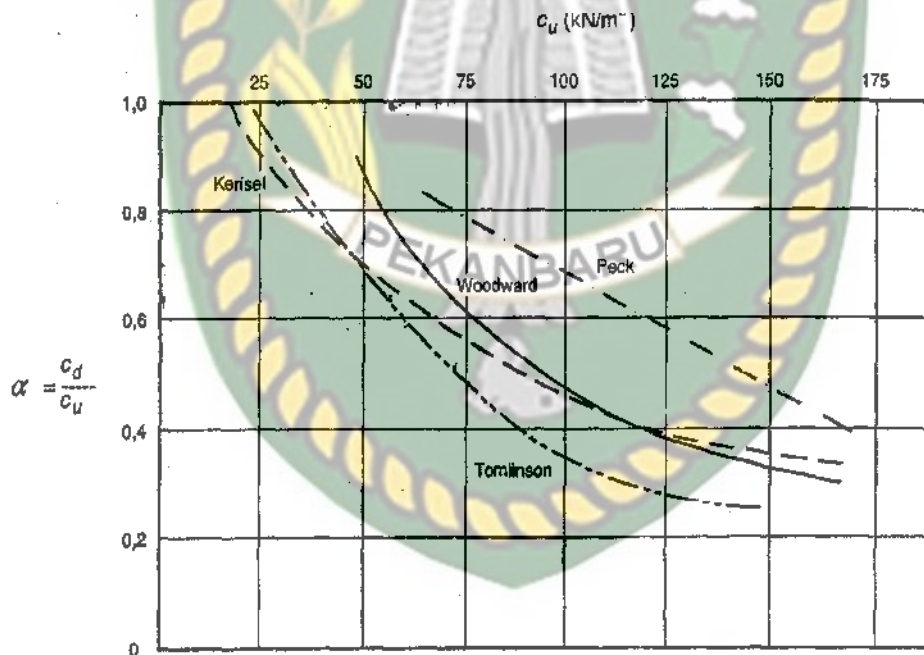
$p_o'$  = rata-rata efektif atas tekanan beban bersama tiang ( $\text{kN/m}^2$ )

$K_d$  = koefisien tekanan tanah lateral di sekitar tiang (Non-dimensi)

$\phi_d$  = sudut gesek antara tanah dan tiang ( $^\circ$ )

tahanan ujung tiang tidak diperhitungkan karena dalam penelitian ini menggunakan diameter tiang yang relatif kecil dengan tanah dasar lempung lunak sehingga kontibusi tanah terhadap tiang menjadi kecil.

Untuk lempung lunak atau lempung terkonsolidasi normal, faktor adhesi dapat sebesar 1,0 (Flemming, dkk, 2009 ; Wai, dkk, 2006 dalam Puri, dkk, 2012). Faktor adhesi  $a_d$  ditentukan berdasarkan kurva Tomlinson pada Grafik McClelland (1974) dengan menggunakan nilai  $c_u$ , dapat dilihat pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.5** Faktor adhesi untuk tiang pancang pada tanah lempung (McClelland, 1974 dalam Agustin, 2017)

Menurut Hardiyatmo (2011), penurunan pelat beban lebih besar dari pada penurunan/perpindahan relatif antara tiang. Hal ini disebabkan ketika pelat turun, tanah disekitar tiang juga turun. Namun, turunnya tiang lebih besar dibandingkan

dengan turunnya tanah di sekitarnya. Karena penurunan relatif antara tanah dan tiang kecil, maka tahanan gesek tiang termobilisasi dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_s = \alpha A_s f_s \quad (3.9)$$

Tahanan gesek tiang termobilisasi dapat dinyatakan sebagai (Hardiyatmo, 2011)

$$R_s = \alpha f_s \quad (3.10)$$

Modulus gesek tiang didefinisikan sebagai (Hardiyatmo, 2011)

$$k_t = \frac{R_s}{\delta_p} \quad (3.11)$$

Persamaan (3.10) dapat dinyatakan sebagai (Puri, dkk, 2012)

$$k_t = \beta R_s \quad (3.12)$$

dengan :

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

$k_t$  = modulus gesek tiang (kN/m<sup>3</sup>)

$\beta$  = faktor unit perlawanan tiang (m<sup>-1</sup>), yang didefinisikan sebagai  $\beta = 1 / \delta_p$

$\delta_p$  = perpindahan kepala tiang (m)

Tambahan modulus tanah-dasar di bawah pelat karena instalasi tiang dinyatakan sebagai kontribusi perlawanan tiang (Puri, dkk, 2012). Hal ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta k A_{ps} = k_t A_s \quad (3.13)$$

dengan :

$A_{ps}$  = Area zona pelat yang didukung oleh tiang tunggal (m<sup>2</sup>)

$A_s$  = s<sup>2</sup> menurut (Hardiyatmo,2011) untuk pelat terpaku

$s$  = jarak tiang (m)

$A_s$  = luas selimut tiang ( $m^2$ )

Pengganti Pers (3.13) ke Pers (3.14), (Puri, dkk, 2012) diperoleh

$$\Delta k = \frac{\beta R_s A_s}{A_{ps}} \quad (3.14)$$

Menganti Pers (3.11) ke Pers (3.15), (Puri, dkk, 2012) diperoleh

$$\Delta k = \frac{\beta \alpha f_s A_s}{A_{ps}} \quad (3.15)$$

Menurut Hardiyatmo (2011), faktor perpindahan tiang ( $\alpha$ ) didefinisikan sebagai:

$$\alpha = \frac{\delta_0}{\delta_s} \quad (3.16)$$

dengan :

$\delta_0$  = perpindahan relatif antara tanah terhadap tiang

$\delta_s$  = penurunan pelat

Menurut Puri, dkk (2012), mobilisasi perlawanan gesek tiang masih dalam zona elastis. Menurut aturan praktis dalam menentukan kapasitas dukung tiang diizinkan biasanya diambil pada 1/2,5 kapasitas ultimit. Diman 2,5 adalah faktor aman ( $SF$ ). Dengan diambil  $\alpha = 1/2,5$  dengan asumsi perpindahan kepala tiang sama dengan penurunan toleransi perkerasan pelat kaku ( $\delta_p = \delta_a$ ; maka  $\beta = 1$ ), oleh karena itu, tambahan modulus reaksi *subgrade* karena adanya tiang dibawah pelat dimodifikasi dengan (Puri, dkk. 2012) :

$$\Delta k = \frac{f_s A_s}{2,5 \delta_a A_{ps}} \quad (3.17)$$

dengan :

$f_s$  = tahanan gesek satuan tiang ( $kN/m^2$ )

$\delta_a$  = toleransi penurunan pelat perkerasan kaku sebesar 5 (mm)

$A_s$  = luas selimut tiang ( $m^2$ )

$A_{ps}$  = luasan zona pelat yang didukung oleh satu tiang ( $m^2$ ),  $A_{ps} = s^2$

$s$  = jarak antar tiang (m)

2,5 = konstanta SF

Menurut Puri (2015) lendutan maksimum pelat akibat beban roda tunggal standar (40 kN) untuk Pelat Terpaku hanya dengan 3 baris tiang adalah lebih kecil dari 1,0 mm. Lendutan ini akan cenderung berkurang dengan semakin panjangnya perkerasan. Di lapangan sistem ini diaplikasikan untuk perkerasan kaku bertulang menerus (CRCP). Menurut Puri (2015) untuk menjaga agar pelat beton tidak mengalami regangan tarik berlebihan maka lendutan toleransi ( $\delta_a$ ) maksimum 5 mm atau 1/256 bentangnya. Balok lantai biasanya dibatasi hingga lendutan maksimum 1/360 bentangnya agar menghindari keretakan pada beton menurut Singer (1985).

Selanjutnya, Pers (3.18) dapat ditulis sebagai (Puri, 2015)

$$\Delta k = \frac{f_s A_s}{SF \delta_a A_{ps}} \quad (3.18)$$

Dengan mensubstitusi Pers (3.2) dan Pers (3.18), persamaan menjadi (Puri, 2015)

$$k' = k + \frac{f_s A_s}{SF \delta_a A_{ps}} \quad (3.19)$$

Pada rumusan sistem pelat terpaku tahanan ujung ultimit ( $Q_b$ ) tidak diperhitungkan karena diameter tiang yang digunakan untuk mendukung pelat beton relatif kecil seperti pada Persamaan (3.4). Sementara diameter tiang lebih besar dibandingkan tiang yang digunakan pada sistem pelat terpaku.

Nilai tahanan ujung ultimit ( $Q_b$ ) jika dihitung menjadi:

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (3.20)$$

Tahanan ujung tiang diungkapkan oleh

$$Q_b = f_b A_b \quad (3.21)$$

Tahanan ujung satuan tiang diungkapkan oleh

$$f_b = c_u N_c \quad (3.22)$$

dengan :

$Q_u$  = kapasitas dukung ultimit tiang (kN)

$Q_b$  = tahanan ujung ultimit tiang (kN)

$Q_s$  = tahanan gesek ultimit tiang (kN)

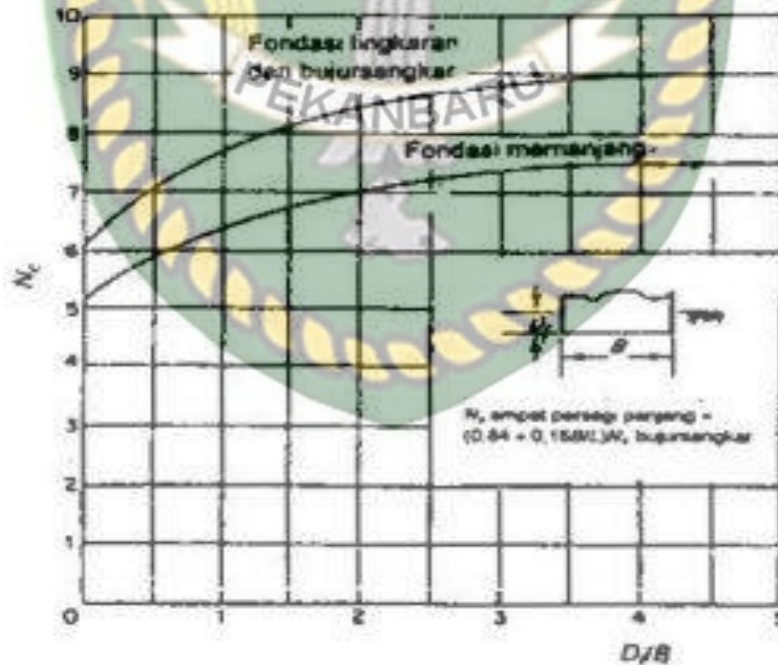
$A_b$  = luas ujung tiang ( $m^2$ )

$f_b$  = tahanan ujung satuan tiang ( $kN/m^2$ )

$c_u$  = undrained kohesi ( $kN/m^2$ )

$N_c$  = faktor kapasitas dukung (diambil  $N_c = 9$ ) (Skempton,1956)

Faktor daya dukung Skempton merupakan fungsi dari  $D_f/B$  dan bentuk pondasi. Pada tanah sangat lunak faktor daya dukung diambil  $N_c = 9$ , berikut disajikan grafik faktor daya dukung Skempton pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.6** Grafik faktor daya dukung  $N_c$  (Skempton,1956 dalam Agustin,2017 )

Selanjutnya, Pers (3.19) dapat ditulis sebagai:



$$\Delta k = \frac{Q_u}{SF\delta_a A_{ps}} \quad (3.23)$$

Dengan mensubstitusi Pers (3.24) dan Pers (3.21), persamaan menjadi (Puri, 2015)

$$\Delta k = \frac{Q_s + Q_b}{SF\delta_a A_{ps}} \quad (3.24)$$

Maka, persamaan menjadi (Puri, 2015)

$$\Delta k = \frac{f_s A_s + f_b A_b}{SF\delta_a A_{ps}} \quad (3.25)$$

Dengan mensubstitusi Pers (3.2) dan Pers (3.26), persamaan menjadi (Puri, 2015)

$$k' = k + \frac{f_s A_s + f_b A_b}{SF\delta_a A_{ps}} \quad (3.26)$$

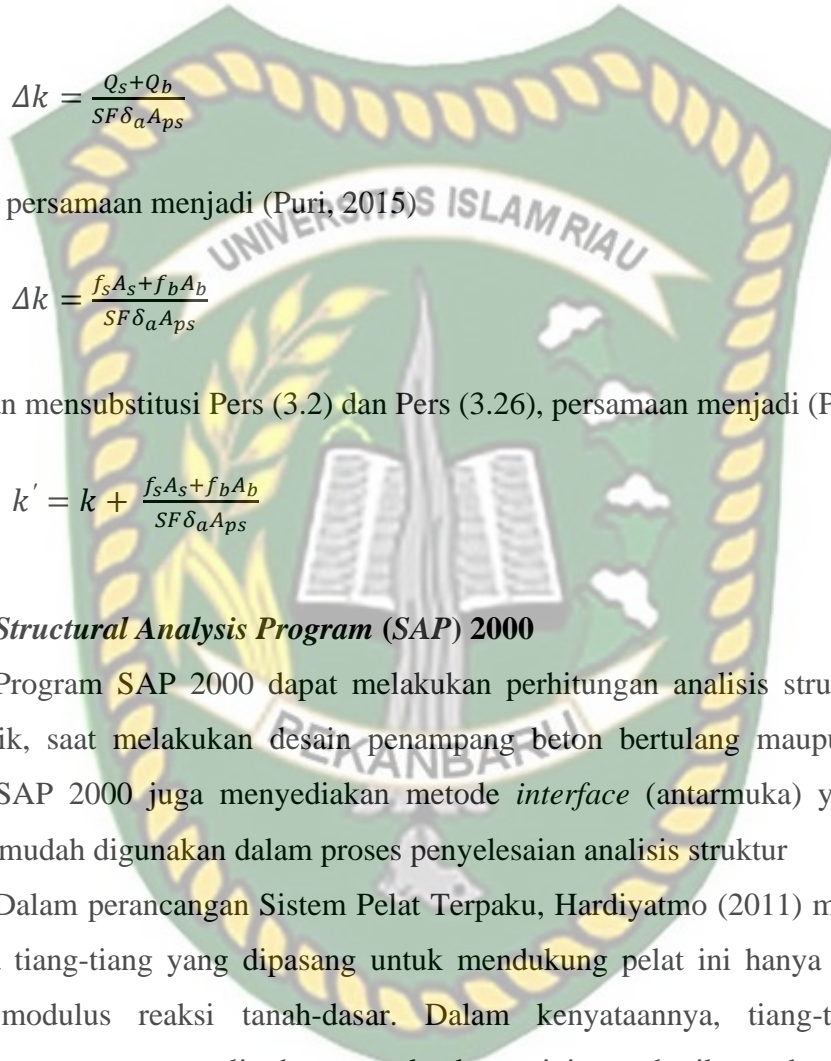
### 3.2 *Structural Analysis Program (SAP) 2000*

Program SAP 2000 dapat melakukan perhitungan analisis struktur statik/dinamik, saat melakukan desain penampang beton bertulang maupun struktur baja, SAP 2000 juga menyediakan metode *interface* (antarmuka) yang secara grafis mudah digunakan dalam proses penyelesaian analisis struktur

Dalam perancangan Sistem Pelat Terpaku, Hardiyatmo (2011) menganggap bahwa tiang-tiang yang dipasang untuk mendukung pelat ini hanya menambah nilai modulus reaksi tanah-dasar. Dalam kenyataannya, tiang-tiang yang terhubung secara monolit dengan pelat beton ini memberikan tahanan momen yang mengurangi defleksi pelat. Dengan asumsi-asumsi tersebut dan karena hitungan dilakukan untuk pelat beton berukuran panjang tertentu yang didukung oleh satu deret tiang-tiang, maka hasil hitungan untuk perancangan akan memberikan hasil yang hati-hati.

#### 3.2.1 Metode Elemen Hingga

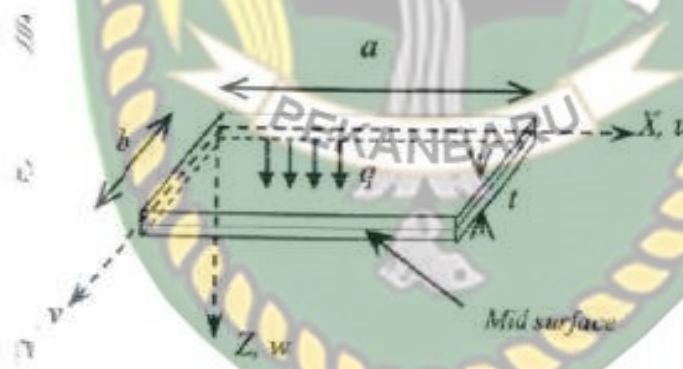
Analisis elemen hingga ditunjukkan untuk memperoleh hasil rinci respons struktur akibat beban kerja. Hasil-hasil analisa digunakan untuk mengevaluasi



kinerja struktur yang telah dirancang terhadap persyaratan kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*) stabilitas, kemampuan layanan (*serviceability*), dan daya tahan (*durability*). Respons struktur tersebut diantaranya berupa bentuk dan besarnya lendutan srtruktur, intensitas dan distribusi tegangan-regangan-*displacement* pada struktur maupun tanah, serta intensitas dan penyebaran tekanan tanah dibawah pelat maupun pada kedalaman tertentu yang ditinjau.

### 3.2.2 Metode Elemen Hingga Pelat Lentur di Atas Tanah Dasar

Pelat dianggap sebagai struktur tipis, dengan  $a \gg t$  dan  $b \gg t$  serta beban luar berupa beban merata  $q$  yang bekerja arah tegak lurus bidang datar (Gambar 3.5) . Struktur dapat dikondisikan sebagai pelat lentur (*plate bending*). Komponen tegangan yang terjadi  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{zx}$  dan  $\tau_{zy}$ , mempunyai nilai yang sangat kecil dibanding dengan komponen-komponen lainnya, sehingga dapat dianggap nol dan komponen-komponen tegangan yang harus diperhitungkan adalah  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ .



**Gambar 3.7** Permukaan pelat tipis lentur (Suhendro, 2000)

Persamaan tegangan dan regangannya adalah (Suhendro, 2000)

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (3.27)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

*Displacement* pada *mid surface* dianggap hanya terjadi pada arah Z tegak lurus terhadap pelat dan merupakan fungsi X dan Y. Berlaku asumsi Khirchoff

dengan setiap garis yang tegak lurus *mid surface* sebelum terjadi *bending* akan tetap tegak lurus *mid surface* setelah *bending* terjadi, maka matriks regangan dapat ditulis sebagai

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

Besarnya momen per satuan panjang terhadap sumbu Y dan X dapat dilihat pada persamaan (3.31) dan (3.32) sedangkan besarnya *twisting moment* per satuan panjang terhadap  $\tau_{xy}$  dapat dilihat pada persamaan (3.33).

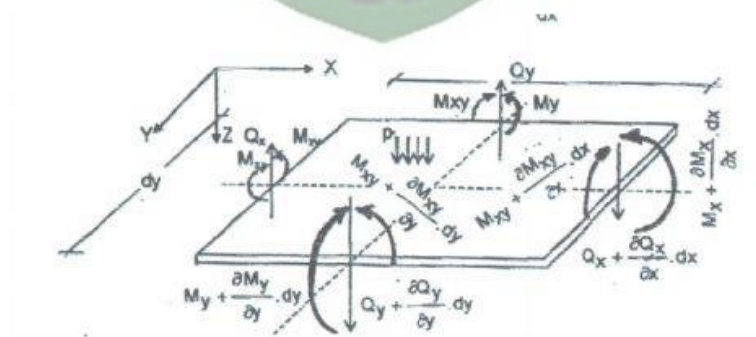
$$M_x = -D \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right\} \quad (3.30)$$

$$M_y = -D \left\{ \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right\} \quad (3.31)$$

$$M_{yx} = M_{xy} = -D (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3.32)$$

dengan :

$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  : kekakuan lentur pelat (*flexural rigidity*),  $M_{xy}$  dan  $M_{yx}$  bekerja pada bidang yang berbeda.



**Gambar 3.8** Keseimbangan gaya dalam *differential element*  $dx dy$  (Suhendro, 2000)

Gambar 3.6 memperlihatkan elemen yang ditinjau pada suatu *differential element*  $dx dy$  yang menerima beban terbagi merata ( $q$ ) dan moment  $M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$  merupakan fungsi  $(x,y)$  dengan keseimbangan gaya dalam yang diperoleh dari persamaan *Governing Differential Equation* untuk defleksi tipis menjadi persamaan (3.34).

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (3.33)$$

Kondisi pelat diatas fondasi elastis (*plate on elastic foundation*), pada kondisi ini pelat langsung berada di atas tanah dan terbebani, sehingga pelat akan mendapatkan perlawanan dari tanah sebesar  $k_s w$  dengan  $w$  merupakan fungsi  $(x,y)$ , dan persamaan tersebut menjadi persamaan (3.35).

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p - k_s w}{D} \quad (3.34)$$

dengan :

$w = \delta$  : deformasi (m)

$k_s$  = koefisien tanah dasar

Untuk analisis linear dengan anggapan geometri struktur sebelum dan sesudah pembebanan tidak mengalami perubahan dan modulus elastisnya dianggap konstan selama pembebanan, maka berlaku persamaan keseimbangan struktur berikut,

$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (3.35)$$

Dengan,  $[K]$  : Matriks kekakuan struktur pada sumbu global

$\{U\}$  : Vector *displacement*

$\{F\}$  : Vector gaya

### 3.2.3 Perilaku Material Pelat

Umumnya material beton memiliki daerah awal pada diagram tegangan-regangannya dimana bahan berperilaku secara elastis dan linier. Model elastis linier

berguna untuk simulasi perilaku struktur bangunan seperti dinding beton yang tebal ataupun pelat dengan sifat kekuatannya yang sangat tinggi. Pada SAP 2000 didasarkan pada Hukum Hooke (Persamaan 3.36) untuk perilaku elastis linier isotropik dan disediakan pada model elastis linier yang sekaligus sebagai dasar model-model lainnya. Notasi matriks kekakuan material elastis sering dinyatakan dengan  $\underline{D}^e$ .  $E'$  adalah modulus elastis efektif dan  $\nu'$  adalah rasio poisson efektif, namun kedua simbol ini pada SAP 2000 tidak menggunakan tanda ( $'$ ).

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}'_{xx} \\ \dot{\epsilon}'_{yy} \\ \dot{\epsilon}'_{zz} \\ \dot{\epsilon}'_{xy} \\ \dot{\epsilon}'_{yz} \\ \dot{\epsilon}'_{zx} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Sesuai dengan Hukum Hooke, maka diperoleh hubungan berikut

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.37)$$

$$K = \frac{E}{3(1+2\nu)} \quad (3.38)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (3.39)$$

Dengan,  $G$  : Modulus geser

$K$  : modulus *bulk*

$E_{oed}$  : parameter alternatif yang dihitung secara oleh program SAP2000 berdasarkan input  $E$  dan  $\nu$ .

Jika dipakai untuk memodelkan elemen struktur, maka model ini sangat cocok digunakan untuk simulasi perilaku struktur pelat terpakai.

### 3.2.4 Elemen Pegas (*spring element*)

Elemen *spring* ini menurut Potts, dkk (2002) dalam setiawan (2015), dijelaskan bahwa sebagai alternatif penggunaan elemen membran (*membrane*) untuk memodelkan elemen struktural, yang menahan gaya aksial saja, kondisi

batas *spring* dapat digunakan. *Spring* dapat diaplikasikan dalam elemen hingga dapat ditempatkan pada:

1. Antara dua nodal dalam *mesh* elemen
2. Nodal tunggal
3. Menerus sepanjang bagian dari daerah batas *mesh*.



Gambar 3.9 Macam penempatan elemen a) Antara 2 nodal, b) Pada nodal tunggal, c) Menerus sepanjang batas *mesh* pegas (Potts, dkk., 2002 dalam Puri, 2015)

Tiap titik nodal (*joint*) yang mempunyai 6 derajat bebas pada struktur dapat mempunyai kondisi tumpuan pegas translasi atau rotasi (CSI, 1998). Pegas yang mendukung sepanjang derajat bebas yang tertahan (*restrained degree of freedom*) tidak memberi kontribusi terhadap kekakuan struktur. Gaya pegas yang bekerja pada sebuah *joint* dihubungkan dengan *displacement joint* tersebut oleh matriks simetris 6x6 dari koefisien kekakuan pegas. Gaya-gaya tersebut cenderung melawan *displacement*. Koefisien kekakuan pegas dapat dinyatakan dalam sistem koordinat global, sistem koordinat alternatif, atau sistem koordinat lokal *joint*. Gambar 3.10 menunjukkan contoh elemen cangkang an di pasang tumpua pegas vertikal, lateral, dan gesek.



Gambar 4.12. Pemodelan skematis untuk cakar dan tanah

Gambar 3.10 contoh elemen cangkang yang di pasang pegas dukungan vertikal ( $k_v$ ), lateral ( $k_h$ ), dan gesek ( $k_t$ ) (Ramadhoni,2008 dalam Puri 2015).

## BAB IV

### METODE PENELITIAN

#### 4.1. Objek Penelitian

Objek penelitian tidak dilakukan di Laboratorium melainkan objek penelitian yang di modelkan dalam program komputer SAP 2000, objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah model perkerasan Sistem Pelat Terpaku

tiang pipa beton tunggal dengan pelat berukuran 1,2 m x 1,2 m x 0,15 m, variasi diameter tiang pipa beton (30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm), dan variasi panjang tiang (1,0 m, 1,5 m, 2,0 m). Salah satu objek yang di teliti dalam penelitian perkerasan sistem pelat terpaku tiang pipa beton tunggal adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Perkerasan Pelat Terpaku tiang tunggal

#### 4.2. Tahapan Penelitian

Tahapan-Tahapan penelitian pada penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

##### 1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder yaitu dari hasil uji skala penuh Sistem Pelat Terpaku pada lempung lunak (Puri, 2017), khusus untuk Pelat Terpaku Tiang Tunggal. Data-data yang dibutuhkan berupa:

- a. Data tanah dan beton
- b. Dimensi perkerasan
- c. Pembebanan
- d. Data tiang spune pile

##### 2. Analisa Data

Pada penelitian ini analisa data dibagi atas dua bagian, yaitu:



- a. Analisa dilakukan menggunakan teori modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dengan variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0), variasi diameter tiang, variasi panjang tiang, dimensi pelat 15 cm.
- b. Perhitungan lendutan dan gaya dalam menggunakan metode Elemen hingga (*finite element mothode*) dengan bantuan program komputer "SAP 2000 Versi 12" *input* nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ )

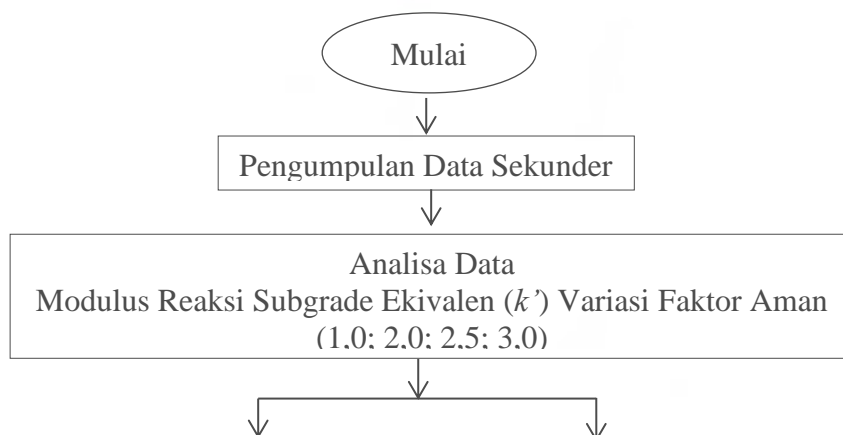
3. Hasil dan pembahasan

Pada tahapan ini menampilkan hasil dari analisis perhitungan lendutan dan momen pada pelat.

4. Kesimpulan

Menyimpulkan perilaku atau pola lendutan akibat penerapan nilai tambahan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen Metode Hardiyatmo Modifikasi dengan pendekatan variasi faktor aman, panjang tiang dan diameter yang digunakan, serta menentukan dapat atau tidak dapat diterapkan secara langsung dalam perencanaan perkerasan Sistem Pelat Terpaku berupa perhitungan lendutan dan momen pada pelat.

Lebih jelasnya tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2.





Gambar 4.2 Bagan alir penelitian

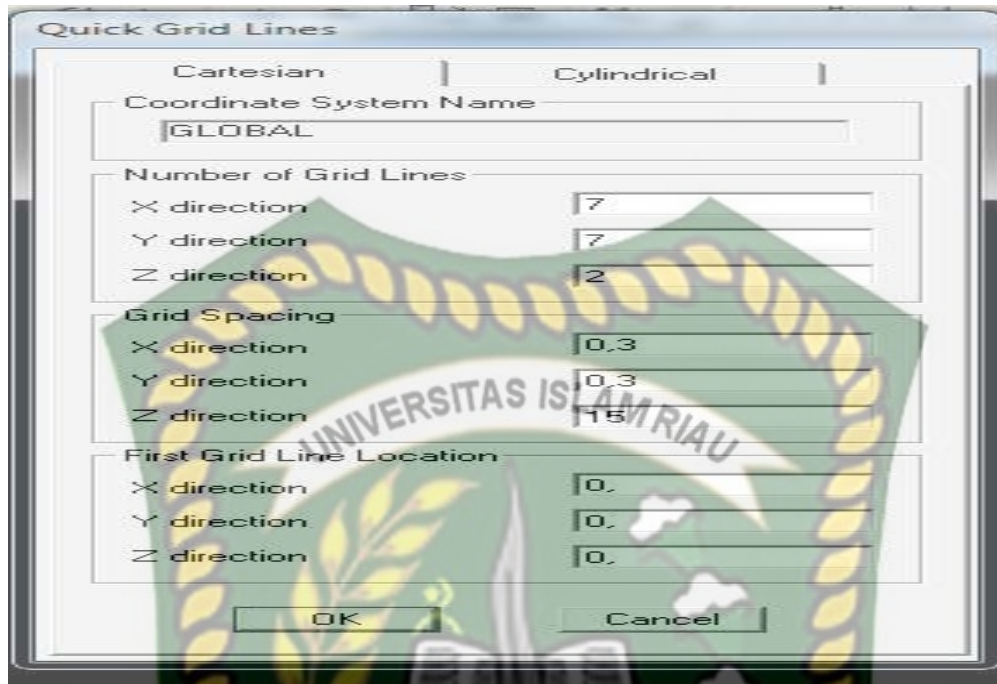
### 4.3. Cara Analisa

Analisis pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan teori modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) Metode Hardiyatmo Modifikasi dalam perkerasan Sistem Pelat Terpaku tiang tunggal, yang akan dilihat adalah perilaku lendutan perhitungan pada pelat yang kemudian dibandingkan dengan lendutan izin sebagai lendutan maksimum ( $\delta_a = 5$  mm). Analisis data dilakukan secara semi-manual, dimana perhitungan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dengan tambahan

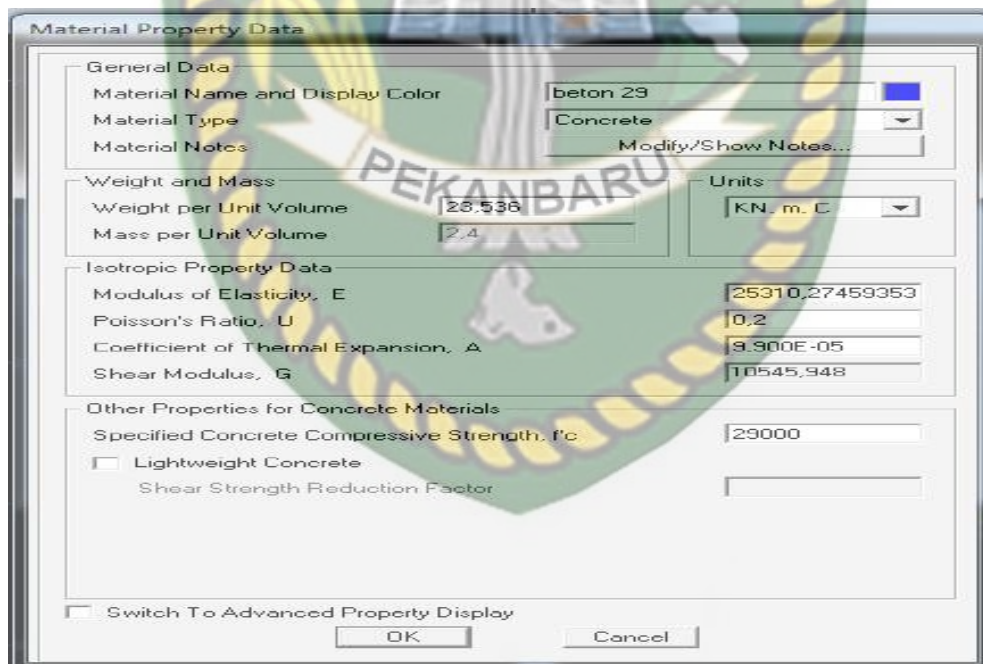
modulus reaksi *subgrade* ( $\Delta k$ ) dilakukan dengan cara manual, sedangkan perhitungan lendutan dan gaya dalam dilakukan dengan menggunakan bantuan program komputer “SAP 2000” versi 12.

Perhitungan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dengan tambahan modulus reaksi *subgrade* akibat adanya tiang ( $\Delta k$ ) Metode Hardiyatmo Modifikasi akan dihitung dengan variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0). Perhitungan  $\Delta k$  pada perkerasan Sistem Pelat Terpaku membutuhkan data-data tiang yang akan digunakan, seperti ukuran pelat, ukuran penampang dan panjang tiang. Kemudian dilakukan analisis terhadap pengaruh tahanan ujung tiang. Awalnya dilakukan analisis dengan mengabaikan tahanan ujung tiang ( $Q_b=0$ ), karena diameter tiang yang kecil dan terletak pada tanah lunak. Namun, pada penelitian ini panjang dan dimensi tiang akan divariasikan, sehingga tetap dilakukan perhitungan tahanan ujung tiang ( $Q_b \neq 0$ ) untuk mengetahui pengaruh  $Q_b$  dan perbandingan hasil terhadap lendutan pelat. Selanjutnya, dilakukan perhitungan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dengan menjumlahkan nilai modulus reaksi *subgrade* tanah ( $k$ ) dan nilai tambahan dari modulus reaksi *subgrade* akibat tiang tunggal ( $\Delta k$ ). Nilai  $k$  diperoleh dari hasil koreksi terhadap ukuran dan bentuk pelat.

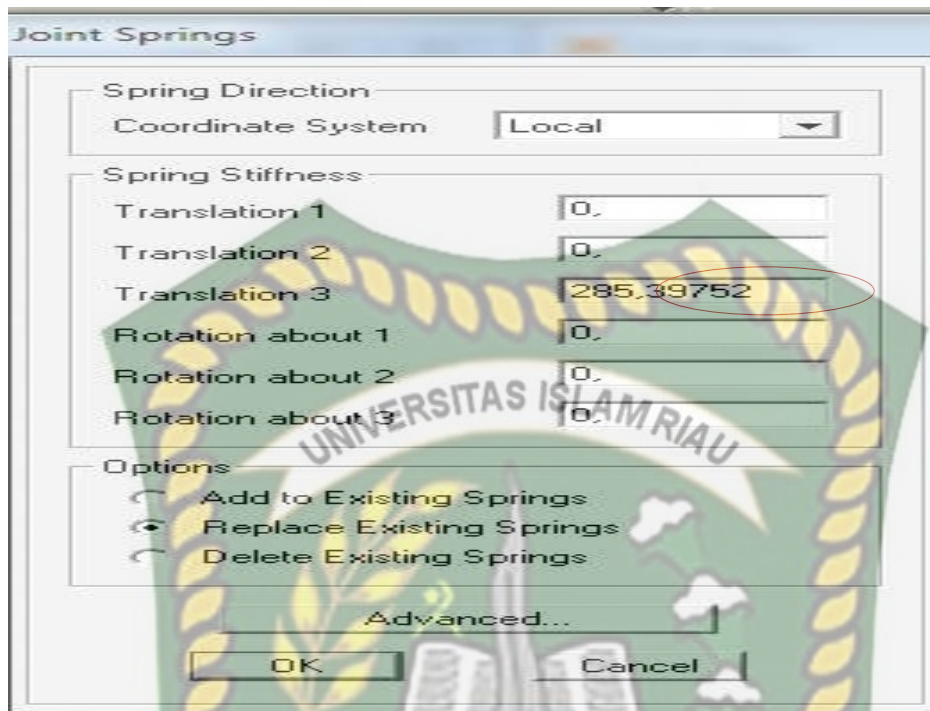
Perhitungan lendutan pada penelitian ini akan digunakan teori metode elemen hingga (*Finite Methode Element*) dengan bantuan program komputer SAP 2000 versi 12. *Input* data pada program “SAP 2000 Version 12” memerlukan data dimensi pelat (panjang pelat, lebar pelat, tebal pelat), modulus elastis beton ( $E_c$ ), massa jenis beton, poisson ratio ( $U$ ), nilai *subgrade* ( $k$ ) yang diproyeksikan dengan nilai modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) serta beban titik yang akan dihitung pada (*point loading*). Pada penelitian ini perhitungan lendutan dengan variasi beban 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN, berikut merupakan tampilan input dari program komputer SAP 2000 ditunjukkan pada Gambar 4.3.



(a) Kotak dialog *Quick Grid Lines* untuk memasukkan data dimensi pelat



(b) Kotak dialog *Material Property Data* untuk memasukkan data material



- (c) Kotak dialog *Joint Spring* untuk memasukkan data  $k'$ , pada penelitian ini data  $k'$  di letakkan di setiap *joint grid* arah “Z/U3” didefinisikan sebagai pegas di yang berada dibawah pelat.



- (d) Kotak dialog *joint forces* untuk memasukkan data beban titik tengah pelat arah “z” dengan beban yang akan divariasikan.

**Gambar 4.3** (a), (b), (c) dan (d) Tampilan *input* data program SAP 2000

Joint Text	U1 KN-s2/m	U2 KN-s2/m	U3 KN-s2/m	KN m
1	0,00288	0,00288	0,00288	
2	0,00576	0,00576	0,00576	
3	0,01152	0,01152	0,01152	
4	0,00576	0,00576	0,00576	
5	0,01152	0,01152	0,01152	
6	0,00576	0,00576	0,00576	
7	0,01152	0,01152	0,01152	
8	0,00576	0,00576	0,00576	
9	0,01152	0,01152	0,01152	
10	0,00576	0,00576	0,00576	
11	0,01152	0,01152	0,01152	
12	0,00576	0,00576	0,00576	
13	0,00576	0,00576	0,00576	
14	0,00288	0,00288	0,00288	
15	0,00576	0,00576	0,00576	
16	0,01152	0,01152	0,01152	
17	0,01152	0,01152	0,01152	
18	0,01152	0,01152	0,01152	
19	0,01152	0,01152	0,01152	
20	0,01152	0,01152	0,01152	
21	0,00576	0,00576	0,00576	

(a) Pada program ini *output* berupa tabel yang terdiri dari beberapa tabel, namun dalam penelitian ini hanya akan diambil *output* berupa tabel nilai lendutan (*displacement*) dan tabel nilai *moment* (*element force*)

Joint Text	Output Case Text	Case Type	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
12	kombinasi	Combination	0	0	-0,638125	0,000036	0,000042	0
13	kombinasi	Combination	0	0	-0,638126	0,000042	0,000036	0
14	kombinasi	Combination	0	0	-0,630118	0,000041	0,000041	0
15	kombinasi	Combination	0	0	-0,644119	-0,000042	0,000021	0
16	kombinasi	Combination	0	0	-0,652985	-0,000043	0,000024	0
17	kombinasi	Combination	0	0	-0,661054	-0,000032	0,000032	0
18	kombinasi	Combination	0	0	-0,664711	0,00000009122	0,000039	0
19	kombinasi	Combination	0	0	-0,661054	0,000032	0,000032	0
20	kombinasi	Combination	0	0	-0,652985	0,000043	0,000024	0
21	kombinasi	Combination	0	0	-0,644119	0,000042	0,000021	0
22	kombinasi	Combination	0	0	-0,646361	-0,000044	2,629E-16	0
23	kombinasi	Combination	0	0	-0,655532	-0,000045	2,751E-16	0
24	kombinasi	Combination	0	0	-0,664711	-0,000039	2,815E-16	0
25	kombinasi	Combination	0	0	-0,671182	0,00000000972	2,855E-16	0
26	kombinasi	Combination	0	0	-0,664712	0,000039	2,871E-16	0
27	kombinasi	Combination	0	0	-0,655532	0,000045	2,882E-16	0
28	kombinasi	Combination	0	0	-0,646361	0,000044	2,901E-16	0
29	kombinasi	Combination	0	0	-0,644119	-0,000042	-0,000021	0
30	kombinasi	Combination	0	0	-0,652985	-0,000043	-0,000024	0
31	kombinasi	Combination	0	0	-0,661054	-0,000032	-0,000032	0
32	kombinasi	Combination	0	0	-0,664711	0,00000009122	-0,000039	0

(b) Tampilan *output* analisis lendutan disajikan dalam bentuk tabel

Element Forces - Area Shells

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

	M22 KN-mm/mm	M12 KN-mm/mm	MMax KN-mm/mm	MMin KN-mm/mm	MAngle Degrees	V13 KN/mm	V23 KN/mm	VMax KN/mm	VAngle Degrees
	0.4381	-0.0417	0.7624	0.4327	-7.322	0.00162	0.00282	0.00325	60.075
	0.5058	-0.1634	0.7184	0.3803	-37.535	0.00162	0.0012	0.00202	36.527
	0.1029	-0.0802	0.3901	0.0805	-15.594	0.00005455	0.0012	0.0012	89.74
	0.0359	0.0415	0.533	0.0325	4.776	0.00005455	0.00282	0.00282	89.889
	0.1661	-0.0005114	0.503	0.1661	-0.087	0.00051	0.00105	0.00117	64.075
	0.1529	-0.0384	0.4354	0.1476	-7.728	0.00051	0.00075	0.00091	55.872
	-0.028	-0.0373	0.3525	-0.0316	-5.599	0.00021	0.00075	0.00078	74.172
	-0.0148	0.0005423	0.4213	-0.0148	0.071	0.00021	0.00105	0.00107	78.507
	-0.0168	0.0094	0.3414	-0.017	1.501	0.00058	-0.00088	0.00105	-56.774
	0.0223	0.0128	0.1975	0.0213	4.19	0.00058	-0.00058	0.00082	-45.281
	0.1686	0.0697	0.2751	0.128	33.196	0.00087	-0.00058	0.00105	-33.655
	0.1291	0.0662	0.3918	0.1124	14.16	0.00087	-0.00088	0.00124	-45.186
	0.1765	0.0948	0.4663	0.1444	18.711	0.00049	-0.00181	0.00187	-74.93
	0.195	0.0414	0.2363	0.1536	45.03	0.00049	-0.00048	0.00069	-44.917
	0.424	0.0947	0.456	0.1442	71.298	0.00181	-0.00048	0.00187	-15.018
	0.4061	0.1481	0.5542	0.258	44.993	0.00181	-0.00181	0.00256	-44.978
	0.5928	0.1631	0.7181	0.3804	52.461	0.0012	-0.00163	0.00202	-53.573
	0.3676	0.0802	0.39	0.0803	74.408	0.0012	-0.00002992	0.0012	-0.143
	0.5295	-0.0414	0.533	0.0326	-85.235	0.00282	-0.00002992	0.00282	-0.061
	0.757	0.0415	0.7624	0.4331	82.691	0.00282	-0.00163	0.00326	-29.941

Record: 98 of 144

Add Tables... Done

(c) Tampilan *output* analisis *moment* disajikan dalam bentuk tabel

Gambar 4.4 (a), (b), (c) Tampilan *output* tabel data program SAP 2000 versi 12

Hasil perhitungan lendutan kemudian di validasikan dengan lendutan maksimum (Puri, 2015a) guna melihat penggunaan faktor aman dan selisih antara lendutan perhitungan dengan lendutan maksimum, serta perbandingan perhitungan untuk  $Q_b=0$  dan untuk  $Q_b \neq 0$ . Hasil lendutan ditampilkan dalam bentuk tabel hasil *output* dari program SAP 2000 pada objek Sistem pelat terpaku tiang tunggal dengan ukuran pelat beton 1,2 m x 1,2 m tebal pelat beton 0,15 m.

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Deskripsi Umum

Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) merupakan hasil penjumlahan antara nilai modulus reaksi *subgrade* ( $k$ ) dengan nilai tambahan modulus reaksi *subgrade* karena adanya tiang ( $\Delta k$ ) pada perkerasan sistem pelat terpaku tiang tunggal. Dalam perhitungan tambahan modulus reaksi *subgrade* Metode Hardiyatmo Modifikasi tidak memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b=0$ ) karena memiliki diameter yang kecil dan terletak pada tanah yang lunak. Apabila diameter tiang yang digunakan memiliki diameter yang lebih besar maka penting untuk memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b \neq 0$ ).

Menurut Puri, dkk (2012) aturan praktis dalam menentukan kapasitas dukung tiang diizinkan biasanya diambil pada 1/2,5 kapasitas ultimit, di mana 2,5 adalah faktor aman ( $SF$ ) dengan asumsi perpindahan kepala tiang sama dengan penurunan toleransi perkerasan pelat ( $\delta_p = \delta_a$ ), dalam formula tambahan modulus reaksi *subgrade* karena adanya tiang. Penerapan pada perkerasan Sistem Pelat Terpaku tiang tunggal akan dicoba dengan variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) dalam formula tambahan modulus reaksi *subgrade* karena adanya tiang ( $\Delta k$ ). Penurunan toleransi pada perkerasan Sistem Pelat Terpaku ditentukan sebesar 5 mm.

#### 5.2 Data Acuan Penelitian

Data acuan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang didapat dari hasil uji Sistem Pelat Terpaku pada lempung lunak (Puri, 2015a) khusus untuk Pelat Terpaku tiang tunggal.





Berdasarkan Gambar 5.1, diketahui bahwa perkerasan Sistem Pelat Terpaku menggunakan tiang pipa beton tunggal dengan pelat beton ukuran 1,2 m x 1,2 m x 0,15 m, variasi diameter tiang pipa beton (30 cm; 40 cm; 50 cm; 50 cm), dan panjang tiang 1,5 m.

### 5.2.1. Klasifikasi Tanah dan Beton

Pada objek penelitian ini klasifikasi diambil dari penelitian sebelumnya (Puri, 2017). Tanah yang digunakan termasuk klasifikasi CH (lempung plastisitas tinggi) menurut USCS atau setara dengan klasifikasi A-7-6 menurut ASSHTO, sedangkan berdasarkan uji kelecakan beton pelat diperoleh *slump* rata-rata sebesar 12,5 cm. Mengacu pada uji kuat tekan beton diperoleh kuat tekan rata-rata pada umur 28 hari sebesar 29,21 Mpa setara dengan mutu beton K350. Sifat-sifat tanah dan beton disajikan dalam Tabel 5.1.

**Tabel 5.1** Sifat-sifat Lempung dan Beton (Puri, 2017)

No.	Parameter	Unit	Rerata
<b>A. Lempung Lunak</b>			
1.	Berat Spesifikasi, $G_s$	-	2,55
2.	Batas-batas Konsistensi :		
	- Batas Cair, $LL$	%	88,46
	- Batas Plastis, $PL$	%	28,48
	- Batas Susut, $SL$	%	9,34
	- Indeks Plastisitas, $PI$	%	59,98
	- Indeks Cair, $LI$	%	0,36
3.	Kadar Air, $w$	%	54,87
4.	Kadar Lempung	%	92,93
5.	Kandungan Pasir	%	6,89
6.	Berat Volume Basah, $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	16,32
7.	Berat Volume Kering, $\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	10,90
8.	Kuat Geser <i>Undrained</i> , $S_u$		
	- Tak Terganggu	kN/m <sup>2</sup>	20,14

	- <i>Remolded</i>	kN/m <sup>2</sup>	11,74
9.	CBR	%	0,83
10.	Klasifikasi Tanah : - AASHTO - USCS	- -	A-7-6 CH

**Tabel 5.1 Lanjutan**

<b>B. Beton</b>			
11.	Pelat beton bertulang: - Kuat tekan, $f_c'$ - Kuat tarik $f_y$	MPa kPa	29,21 3,13
12.	Kuat tekan beton tiang, $f_c'$	MPa	17,4
13.	Kuat tekan lantai kerja, $f_c'$	MPa	14,5

### 5.2.2 Data dan Besaran Perhitungan

Perhitungan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dan tambahan modulus reaksi *subgrade* karena adanya tiang ( $\Delta k$ ) menggunakan metode Hardiyatmo modifikasi dengan variasi faktor aman dan variasi dimensi tiang, dalam perhitungan  $k'$  dan  $\Delta k$  maka dibutuhkan data dan besaran yang ditampilkan pada Tabel 5.2

**Tabel 5.2** Data untuk perhitungan modulus  $\Delta k$  dan  $k'$

No.	Parameter	Satuan	Nilai	Keterangan
1.	Dimensi pelat beton bertulang, i. Panjang, ( $L$ ) ii. Lebar, ( $B$ ) iii. Tebal, ( $T$ )	m m m	1,2 1,2 0,15	Perhitungan ditinjau pada pelat tiang tunggal, maka $B = s$ yaitu 1,2 m

2.	Diameter tiang pipa beton i. Diameter	m	0,3 0,4 0,5 0,6	Lendutan izin maksimum untuk tiang pipa beton ( $\delta_a=5$ mm)
	ii. Panjang, ( $L_p$ )	m	1 1,5 2,0	
3.	Kohesi <i>undrained</i> ( $c_u$ )	kN/m <sup>2</sup>	20,14	-
4.	Uji lapangan, $k_v$	kN/m <sup>3</sup>	15.000	-
5.	Modulus reaksi <i>subgrade</i> ( $k$ )	kN/m <sup>3</sup>	4.500	Koreksi $k_v$ dengan metode Das (2011) yang kemudian dikalikan $B$
6.	Tahanan satuan ultimit,			Dari kohesi ( $c$ ) berdasarkan kurva Tomlinson pada Grafik Mc Clelland (1974) diperoleh faktor adhesi ( $\alpha_d$ ) = 1,0, maka $f_s = c_u \alpha_d$
	i. Tahanan gesek satuan ultimit, ( $f_s$ )	kN/m <sup>2</sup>	20,14	

**Tabel 5.2** Lanjutan

	ii. Tahanan ujung satuan ultimit, ( $f_b$ )	kN/m <sup>2</sup>	181,26	Pada tanah lunak menurut Skempton (1959) faktor kapasitas dukung ( $N_c$ ) = 9, maka $f_b = c_u N_c$
7.	Luas pelat yang didukung tiang, ( $A_{ps}$ )	m <sup>2</sup>	1,44	

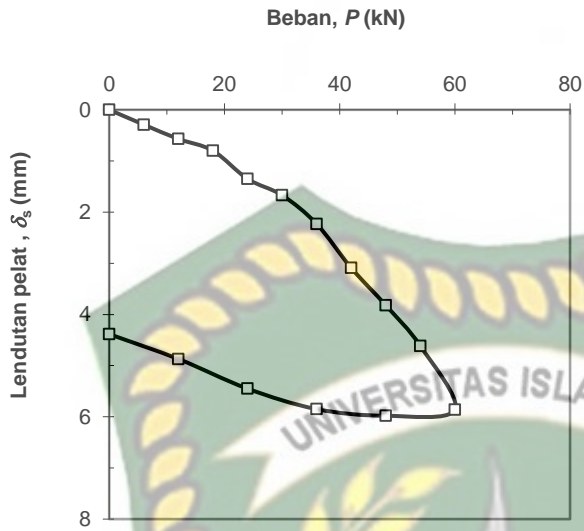
**Tabel 5.3** Nilai  $A_s$  dan  $A_b$  dari variasi diameter tiang pipa beton

diameter (m)	Ab (m <sup>2</sup> )	As (m <sup>2</sup> )		
		1,0	1,5	2,0
0,3	0,24	0,942	1,413	1,884
0,4	0,325	1,256	1,884	2,512
0,5	0,41	1,57	2,355	3,14
0,6	0,5	1,884	2,826	3,768

Dari Tabel 5.3 diketahui nilai selimut tiang ( $A_s$ ) dan luas ujung penampang tiang pipa beton ( $A_b$ ) dari variasi diameter tiang pipa tunggal yang digunakan dalam perhitungan modulus  $\Delta k$ . Nilai tambahan modulus reaksi *subgrade* ekivalen ( $\Delta k$ ) dan nilai modulus reaksi *subgrade* ekivalen ( $k'$ ) berdasarkan lendutan izin maksimum  $\delta_a = 5$  mm (Puri, 2015) dengan variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) dan variasi tiang pipa beton tunggal untuk tahanan ujung tiang di abaikan ( $Q_b = 0$ ) pada lampiran A-10 dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) pada lampiran A-17. Pelat yang dianalisis dibebani dengan pembebanan di tengah pelat dengan variasi beban sebesar 0 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN dengan panjang yang digunakan adalah 1,5 m kemudian divariasi panjang ( $L_p$ ) 1,0 m dan 2,0 m dan tebal pelat 15 cm.

### 5.2.3 Pembebanan

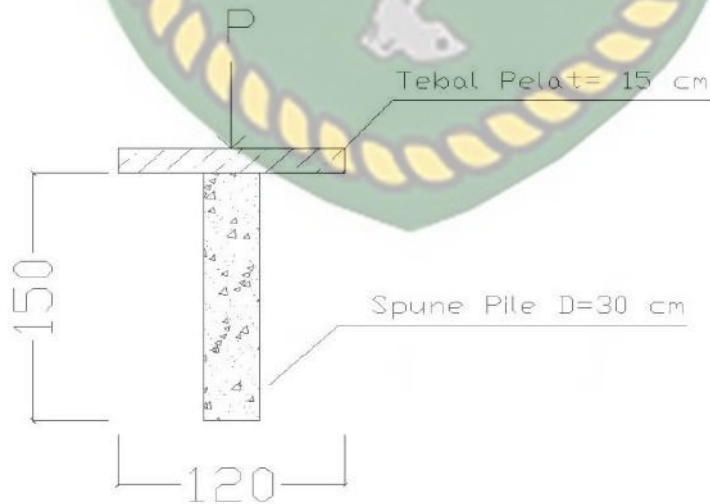
Beban yang digunakan pada penelitian ini sebesar 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN dan 60 kN, sesuai dengan beban yang ditinjau pada penelitian terdahulu (Puri, 2017). Hubungan beban dan lendutan pelat diberikan pada Gambar 5.1. Perhitungan berdasarkan lendutan pengamatan sebagai lendutan izin ( $\delta_a = 5$  mm) ditinjau pada pembebanan tengah pelat.



Gambar 5.2 Hubungan  $P$ - $\delta$  Pelat Terpaku tiang tunggal (Puri, 2017).

### 5.3 Pengaruh Variasi Faktor Aman untuk Tiang Diameter 30 cm dengan $L_p = 1,5$ m

Pada penelitian ini akan divariasikan nilai faktor aman (1,0; 2,0; 2,5;3,0) pada setiap beban yang bekerja diatas pelat guna mengetahui perbedaan lendutan pelat yang dihasilkan dalam perancangan.



Gambar 5.3 Tiang pipa beton diameter 30 cm  $L_p = 1,5$

Tiang yang digunakan berukuran 30 cm dengan panjang tiang 1,5 m. Hasil perhitunga lendutan berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a=5\text{mm}$ ) ditinjau pada pembebanan tengah pelat yaitu (5, 10, 20, 40, 60) dalam satuan kN.

### 5.3.1 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b=0$

Nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k'$ ) dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.20) tambahan nilai modulus reaksi *subgrade* ( $\Delta k$ ) juga juga dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.19) dengan tidak memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b=0$ ) , dengan faktor aman yang divariasikan yaitu (1,0; 2,0; 2,5; 3,0). Hasil perhitungan nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk tiang berdiameter 30 cm dengan panjang ( $L_p$ ) 1,5 m yang ditampilkan dalam Tabel 5.2.

**Tabel 5.4** nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk  $Q_b=0$

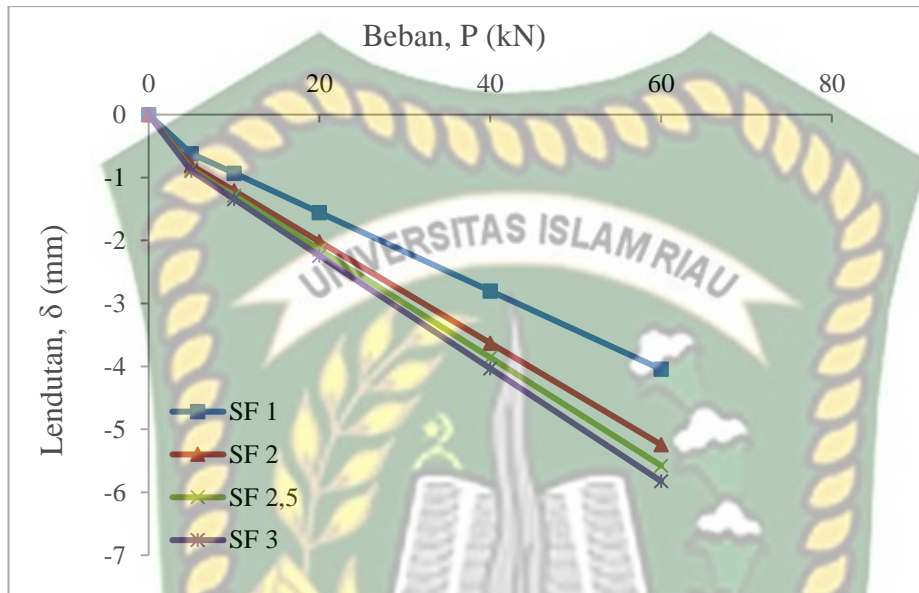
$L_p$ (m)	Diameter (cm)	SF	$\Delta k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k'$ (kN/m <sup>3</sup> )
1,5	30	1,0	3.952,48	8.452,48
		2,0	1.976,24	6.476,24
		2,5	1.580,99	6.080,99
		3,0	1.317,49	5.817,49

Pada Tabel 5.2 hasil perhitungan berdasarkan  $\delta_a= 5$  mm pada pembebanan di tengah pelat untuk tahanan ujung tiang tidak diperhitungkan ( $Q_b=0$ ). Maka dapat diketahui bahwa dengan meningkatnya nilai faktor aman maka nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  akan semakin kecil. Jadi pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  paling besar dibanding dengan variasi faktor aman lainnya. Untuk lebih jelas perhitungan dapat dilihat pada Lampiran A.5

### 5.3.2 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap Hasil Lendutan dan Momen

Pengaruh variasi faktor aman terhadap hasil lendutan dan momen untuk tahanan ujung tiang tidak diperhitungkan ( $Q_b =0$ ) ditunjukkan pada Gambar 5.3 dan 5.4 pola lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat. Nilai lendutan

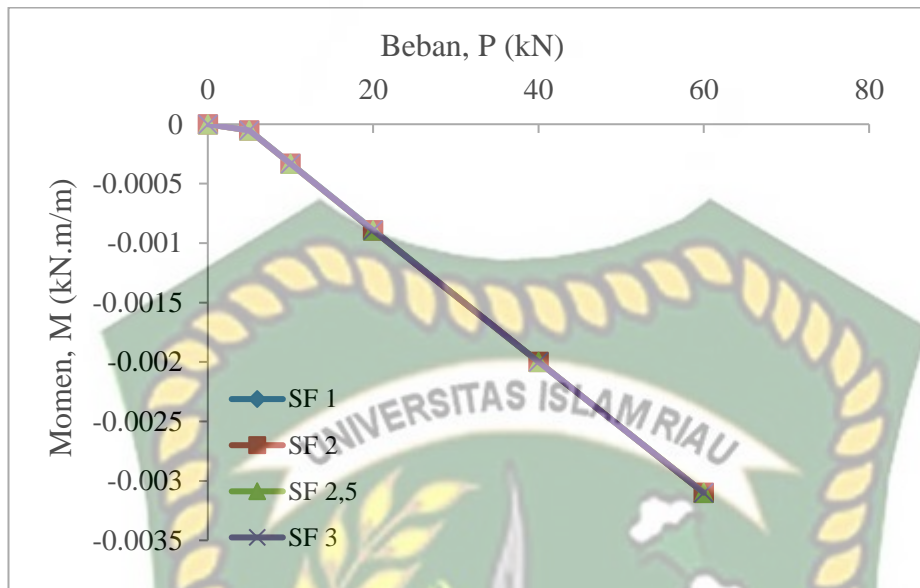
diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer *SAP 2000* versi 12.



**Gambar 5.4** Hubungan  $P$ - $\delta$  dengan variasi faktor aman untuk ( $Q_b=0$ )

Dari Gambar 5.4 hubungan beban dan lendutan dengan variasi faktor aman dapat dilihat bahwa pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki lendutan sebesar -4,77 mm lendutan ini lebih kecil dibandingkan dengan variasi faktor aman lainnya . Untuk hubungan momen dan beban dengan variasi  $SF$  disajikan pada Gambar 5.4.





**Gambar 5.5** Hubungan antara beban dan momen dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b=0$

Dari Gambar 5.5 Hubungan antara beban dan momen diatas dapat dilihat bahwa variasi faktor aman (SF) tidak berpengaruh pada momen pelat karena beban di asumsikan tegak lurus terhadap tiang.

### 5.3.3 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$

Nilai tambahan modulus reaksi *subgrade* ( $\Delta k$ ) dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.26) nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k'$ ) juga dihitung dengan menggunakan persamaan 3.27 dengan memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b \neq 0$ ), dengan faktor aman yang divariasikan yaitu (1,0; 2,0; 2,5; 3,0). Hasil perhitungan nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk tiang berdiameter 30 cm dengan panjang ( $L_p$ ) 1,5 m yang ditampilkan dalam Tabel 5.3.

**Tabel 5.5** nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  unuk  $Q_b \neq 0$

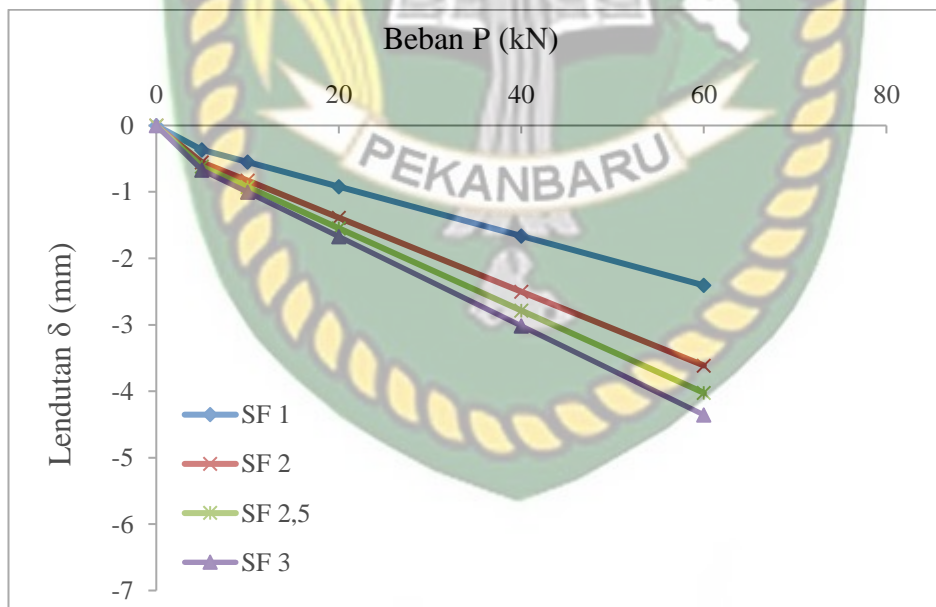
Lp (m)	Diameter (cm)	SF	$\Delta k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k'$ (kN/m <sup>3</sup> )
1,5	30	1	9.994,48	14.494,48
		2	4.997,24	9.497,24
		2,5	3.997,79	8.497,79

		3	3.331,49	7.831,49
--	--	---	----------	----------

Hasil perhitungan berdasarkan  $\delta_a = 5$  mm pada pembebanan di tengah pelat untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ). Maka terlihat bahwa dengan meningkatnya angka faktor aman maka nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  menjadi semakin kecil. Jadi pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  paling besar dibanding dengan faktor aman lainnya. Untuk lebih jelasnya perhitungan dapat dilihat pada Lampiran A.13

### 5.3.4 Pengaruh Variasi Faktor Aman Terhadap Hasil Lendutan dan Momen

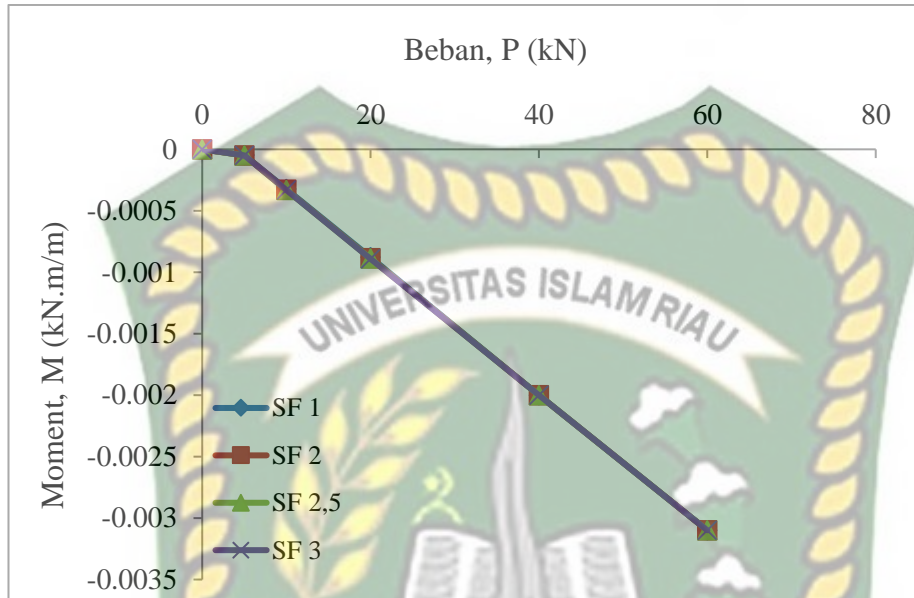
Pengaruh variasi faktor aman terhadap hasil lendutan dan momen untuk tahanan ujung tiang di perhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) ditunjukkan pada Gambar 5.5 dan 5.6 pola lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat. Nilai lendutan diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer SAP 2000 versi 12.



**Gambar 5.6** Hubungan  $P-\delta$  dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b \neq 0$

Dari Gambar 5.6 Hubungan beban dan lendutan dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b \neq 0$ , dapat dilihat bahwa pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki lendutan sebesar -2,64 mm lendutan ini paling kecil dibandingkan variasi faktor

aman lainnya. Untuk hubungan momen dan beban dengan variasi faktor aman disajikan pada Gambar 5.7.

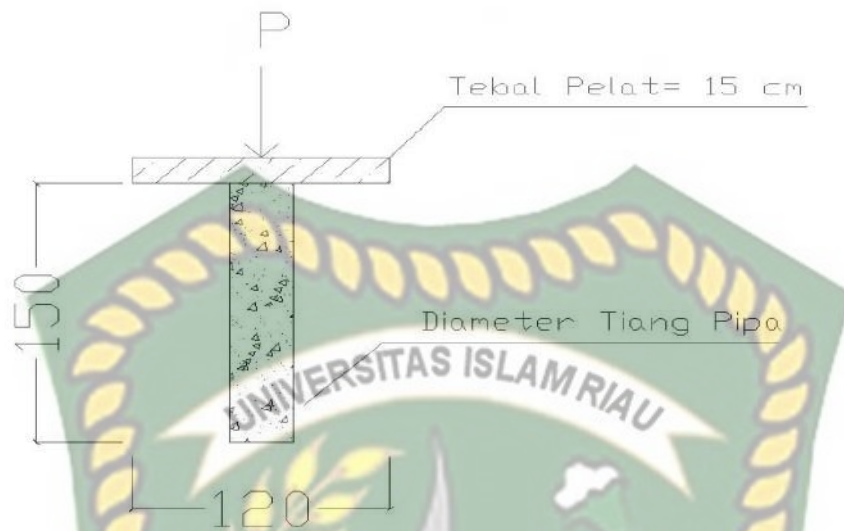


**Gambar 5.7** Hubungan antara beban dan momen dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b \neq 0$

Jadi dari kedua grafik hubungan beban dan lendutan dengan variasi faktor aman yang ditunjukkan pada Gambar 5.4 dan 5.6 dapat dilihat bahwa pada penggunaan faktor aman ( $SF$ ) 1,0 menghasilkan lendutan terkecil, ditinjau dari perbandingan untuk tahanan ujung tiang tidak diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ), maka terlihat bahwa  $Q_b \neq 0$  menghasilkan lendutan lebih kecil disetiap variasi faktor aman, dibanding dengan  $Q_b=0$ . Untuk hubungan beban dan momen dapat dilihat pada Gambar 5.5 dan 5.7 bahwa penggunaan variasi faktor aman tidak mengalami perubahan.

#### 5.4 Pengaruh Variasi Diameter untuk Panjang Tiang 1,5 m

Selain dari variasi faktor aman untuk menghitung nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  pada perkerasan sistem pelat terpaku tiang pipa beton tunggal, pada penelitian ini juga menyertakan analisis variasi diameter tiang.



**Gambar 5.8** tiang pipa beton Lp 1,5 m

#### 5.4.1 Pengaruh Variasi Diameter Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b=0$

Variasi diameter tiang yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, hasil perhitungan lendutan berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a=5$  mm) ditinjau pada pembebanan di tengah pelat yaitu 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN. Berikut adalah tabel hasil perhitungan nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  saat  $Q_b=0$  untuk variasi tiang tiang pada dengan panjang 1,5 m yang disajikan pada Tabel 5.4.

**Tabel 5.6** nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  dengan variasi diameter untuk  $Q_b=0$

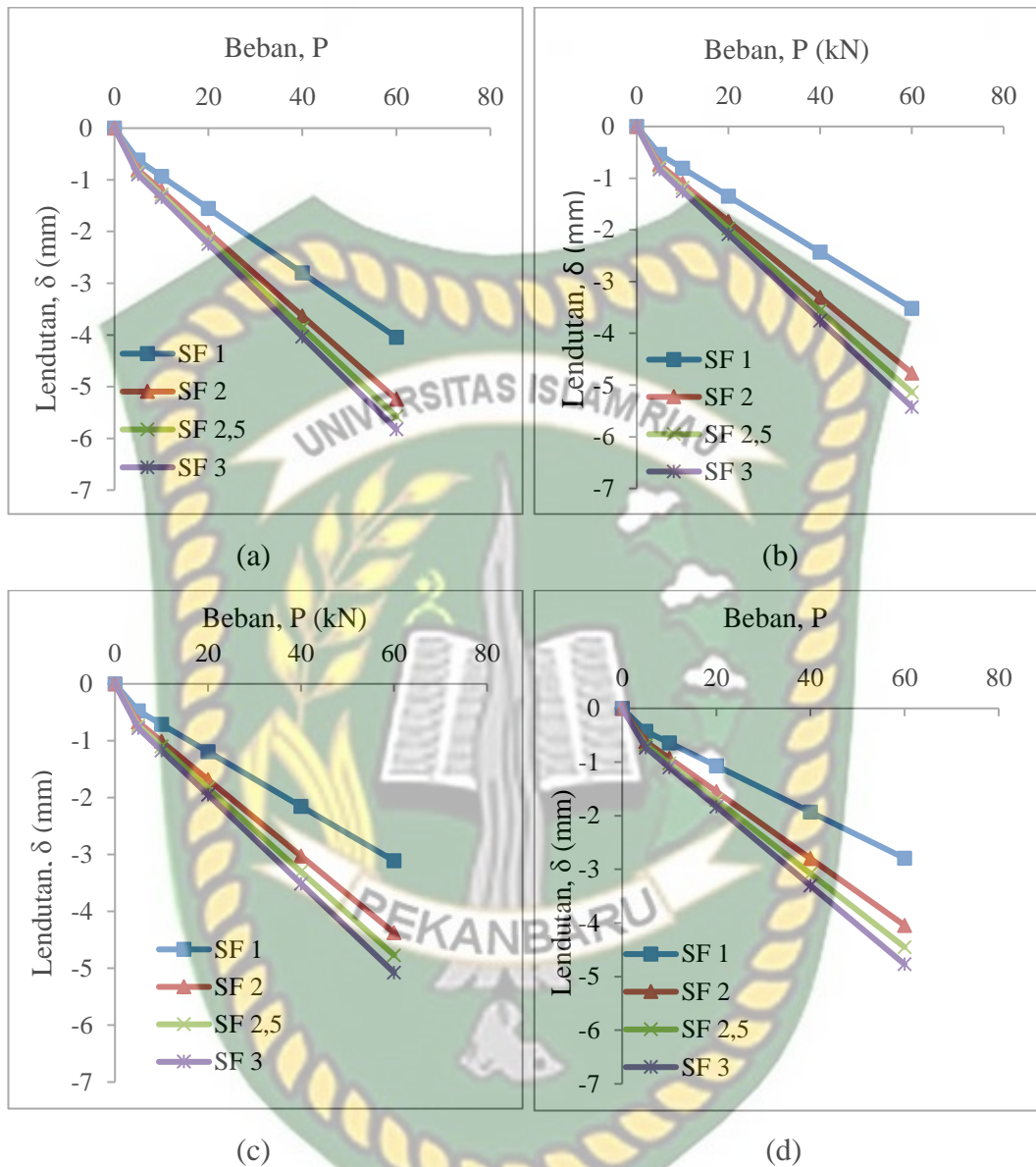
Lp (m)	Diameter (cm)	SF	$\Delta k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k'$ (kN/m <sup>3</sup> )
1,5	30	1,0	3.952,48	8.452,48
		2,0	1.976,24	6.476,24
		2,5	1.580,99	6.080,99
		3,0	1.317,49	5.817,49
	40	1,0	5.269,97	9.769,97
		2,0	2.634,98	7.134,98
		2,5	2.107,99	6.607,99
		3,0	1.756,66	6.256,66

50	1,0	6.587,46	11.087,46
	2,0	3.293,73	7.793,73
	2,5	2.634,98	7.134,98
	3,0	2.195,82	6.695,82
60	1,0	7.904,95	12.404,95
	2,0	3.952,48	8.452,48
	2,5	3.161,98	7.661,98
	3,0	2.634,98	7.134,98

Hasil perhitungan berdasarkan  $\delta_a = 5$  mm pada pembebanan di tengah pelat untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ). Maka dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya nilai faktor aman dan diameter tiang maka nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  menjadi semakin kecil. Jadi pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  paling besar dibanding dengan variasi faktor aman lainnya. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada lampiran A

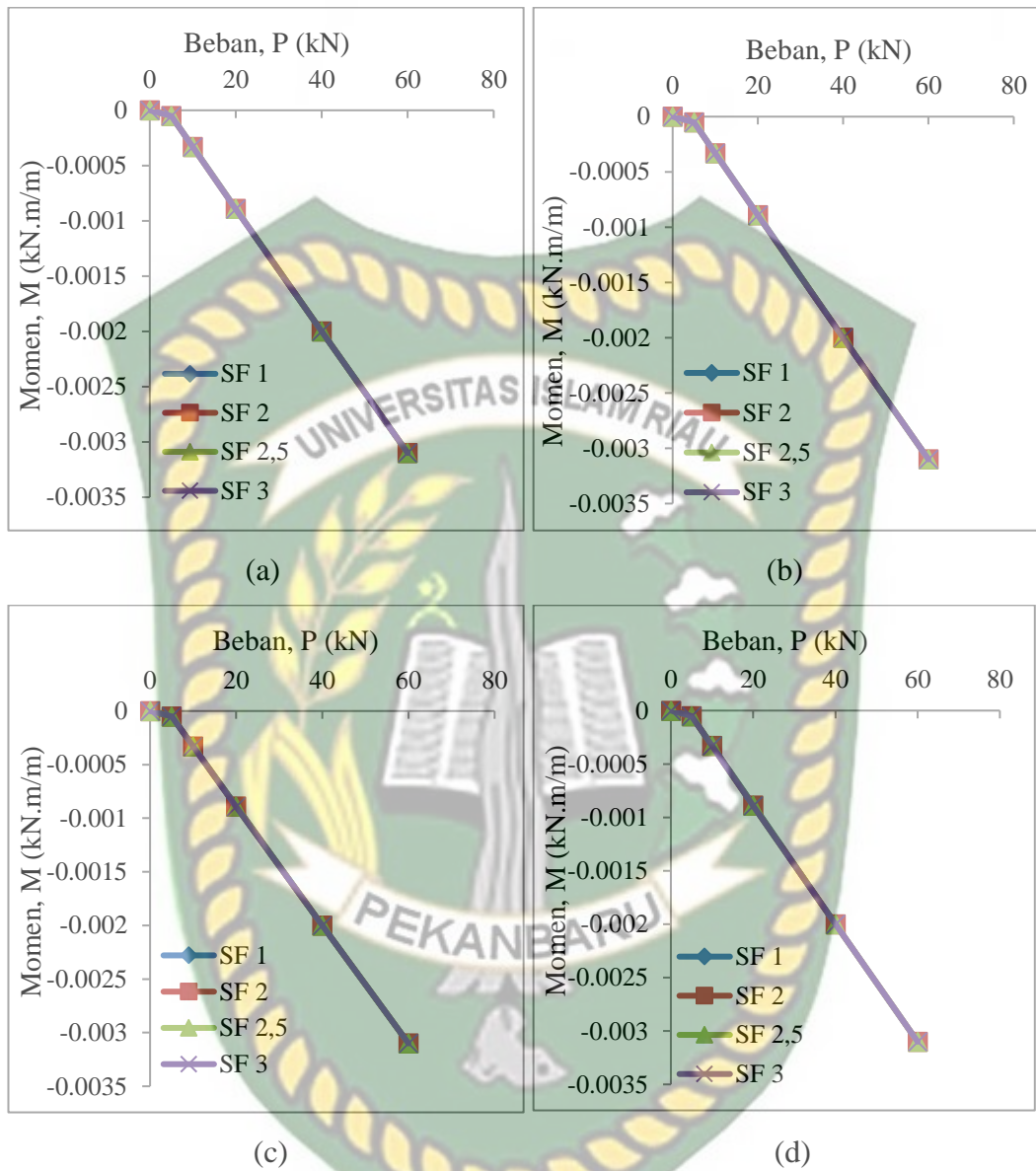
#### 5.4.2 Pengaruh Variasi Diameter Terhadap Lentutan dan Momen

Pengaruh variasi faktor aman dan variasi diameter tiang terhadap hasil lentutan dan momen untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ), hasil yang ditampilkan berupa grafik lentutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat. Nilai lentutan dan momen diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer SAP 2000 versi 12. Berikut adalah grafik hubungan antara beban dan lentutan yang disajikan pada Gambar 5.8 serta grafik hubungan antara beban momen dan momen yang disajikan pada Gambar 5.9 dengan variasi faktor aman (1,0; 2,0; 2,5; 3,0) dan variasi diameter tiang pipa (30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm) pada tiang dengan panjang 1,5 m.



**Gambar 5.9** Hubungan antara  $P$ - $\delta$  dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b=0$   
 (a) Diameter 30 cm, (b) Diameter 40 cm, (c) Diameter 50 cm, (d) Diameter 60 cm

Dari Gambar 5.8 dapat dilihat bahwa penggunaan faktor aman ( $SF$ ) 1,0 memiliki lendutan paling kecil dari pada variasi faktor aman lainnya selain itu ukuran diameter tiang juga mempengaruhi lendutan yang terjadi pada pelat, karena semakin besar diameter tiang juga menyebabkan lendutan pada pelat menjadi semakin kecil. Hubungan momen dan beban dengan variasi faktor aman ( $SF$ ) untuk  $Q_b=0$  disajikan pada Gambar 5.9



**Gambar 5.10** Hubungan antara  $P$ - $M$  dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b=0$  (a) Diameter 30 cm, (b) Diameter 40 cm, (c) Diameter 50 cm, (d) Diameter 60 cm

Dilihat dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.9 Hubungan antara beban dan momen ( $P$ - $M$ ) dengan variasi faktor aman dan diameter tiang untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b=0$ ) menunjukkan bahwa variasi faktor aman dan variasi diameter tiang tidak berpengaruh pada momen pelat.

#### 5.4.3 Pengaruh Variasi Diameter Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$

Variasi penampang tiang yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, hasil perhitungan lendutan berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a= 5$  mm) ditinjau pada pembebanan di tengah pelat yaitu 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN. Berikut adalah tabel hasil perhitungan nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  saat  $Q_b \neq 0$  untuk variasi ukuran penampang tiang pada dengan panjang 1,5 m yang disajikan pada Tabel 5.5

**Tabel 5.7** Nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk  $Q_b \neq 0$

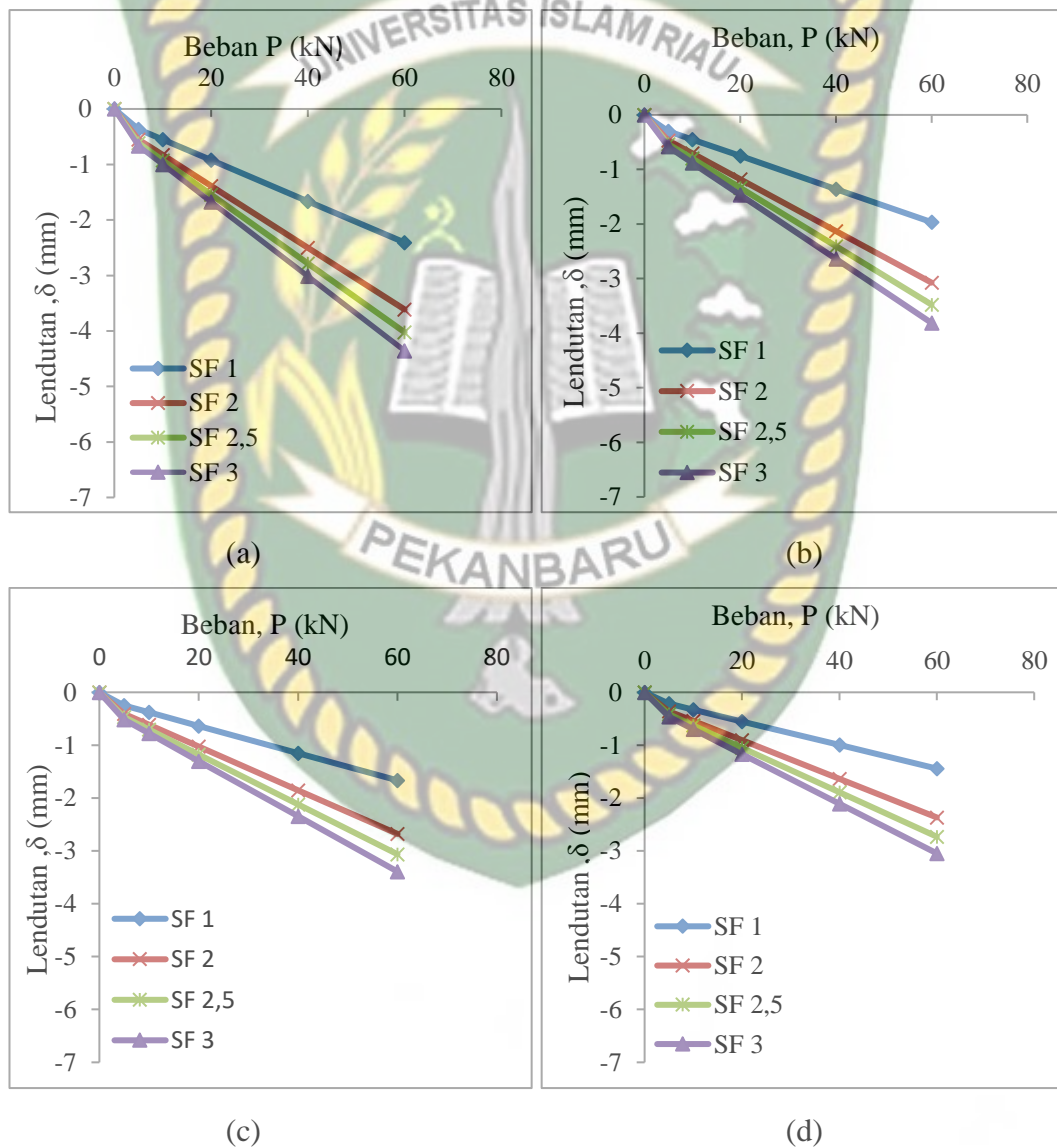
Lp (m)	Diameter (cm)	SF	$\Delta k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$K'$ (kN/m <sup>3</sup> )
1,5	30	1,0	9.994,48	14.494,48
		2,0	4.997,24	9.497,24
		2,5	3.997,79	8.497,79
		3,0	3.331,49	7.831,49
	40	1,0	13.451,84	17.951,84
		2,0	6.725,92	11.225,92
		2,5	5.380,74	9.880,74
		3,0	4.483,95	8.983,95
	50	1,0	16.909,21	21.409,21
		2,0	8.454,60	12.954,60
		2,5	6.763,68	11.263,68
		3,0	5.636,40	10.136,40
	60	1,0	20.492,45	24.992,45
		2,0	10.246,23	14.746,23
		2,5	8.196,98	12.696,98
		3,0	6.830,82	11.330,82

Dari Tabel 5.7 Hasil perhitungan berdasarkan  $\delta_a= 5$  mm pada pembebanan di tengah pelat saat  $Q_b \neq 0$ . Maka terlihat bahwa dengan meningkatnya angka faktor aman nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  menjadi semakin kecil. Jadi pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  paling besar dibanding dengan faktor aman lainnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada lampiran A.

#### 5.4.4 Pengaruh Variasi Diameter Terhadap Lendutan dan Momen ( $Q_b \neq 0$ )

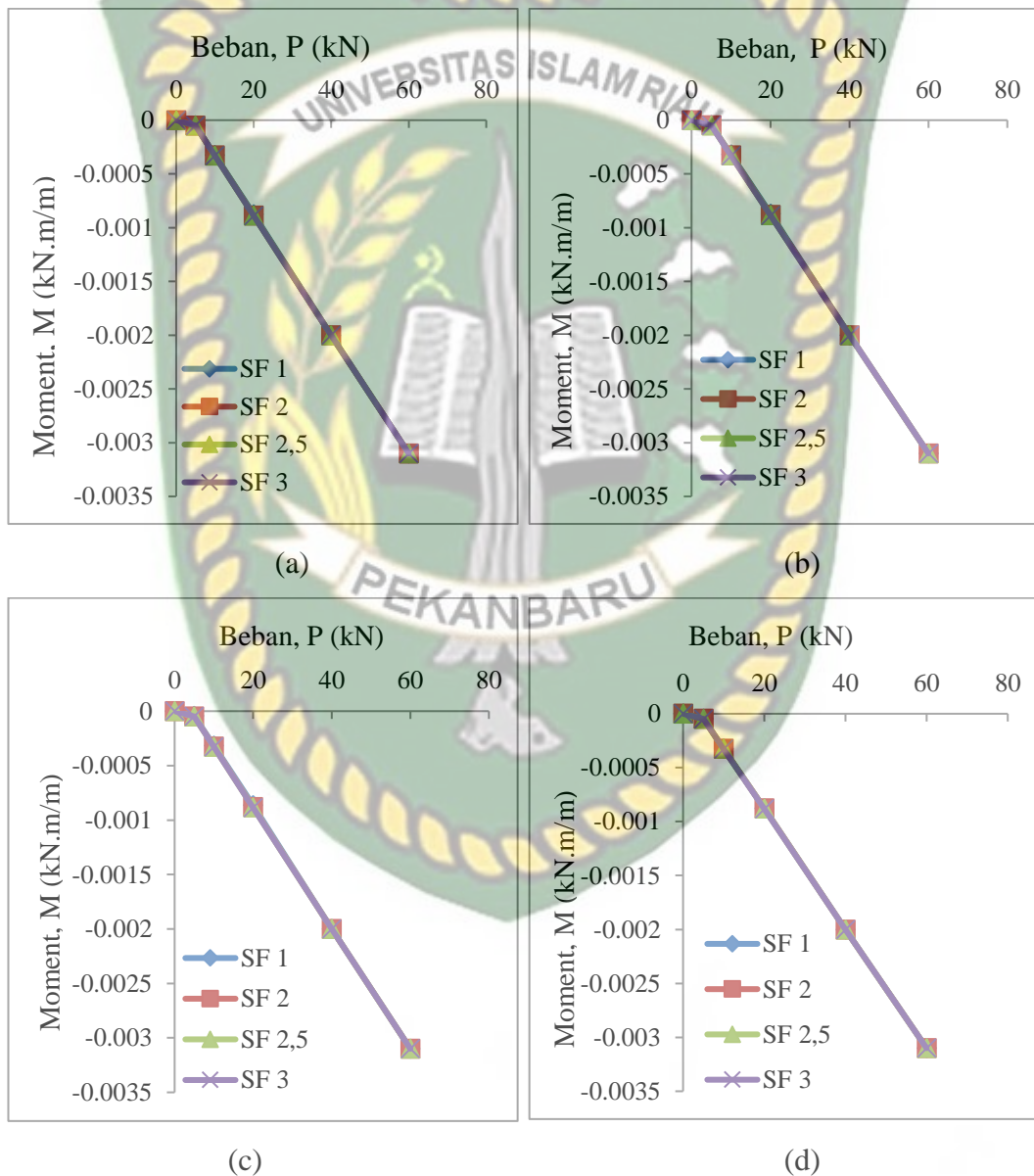


Pengaruh variasi faktor aman dan variasi diameter tiang terhadap hasil lendutan dan momen untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b \neq 0$ ), hasil yang ditampilkan berupa grafik lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat. Nilai lendutan dan momen diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer SAP 2000 versi 12. Berikut adalah grafik hubungan antara beban dan lendutan yang disajikan pada Gambar 5.11 serta grafik hubungan antara beban momen dan momen yang disajikan pada Gambar 5.12.



**Gambar 5.11** Hubungan antara  $P$ - $\delta$  dengan variasi diameter untuk  $Q_b \neq 0$  (a) Diameter 30 cm, (b) Diameter 40 cm, (c) Diameter 50 cm, (d) Diameter 60 cm

Dari Gambar 5.11 dapat dilihat bahwa penggunaan faktor aman ( $SF$ ) 1,0 memiliki lendutan paling kecil dari pada variasi faktor aman lainnya selain itu ukuran diameter tiang juga mempengaruhi lendutan yang terjadi pada pelat, karena semakin besar diameter tiang juga menyebabkan lendutan pada pelat menjadi semakin kecil. Hubungan momen dan beban dengan variasi faktor aman ( $SF$ ) untuk  $Q_b \neq 0$  disajikan pada Gambar 5.12.



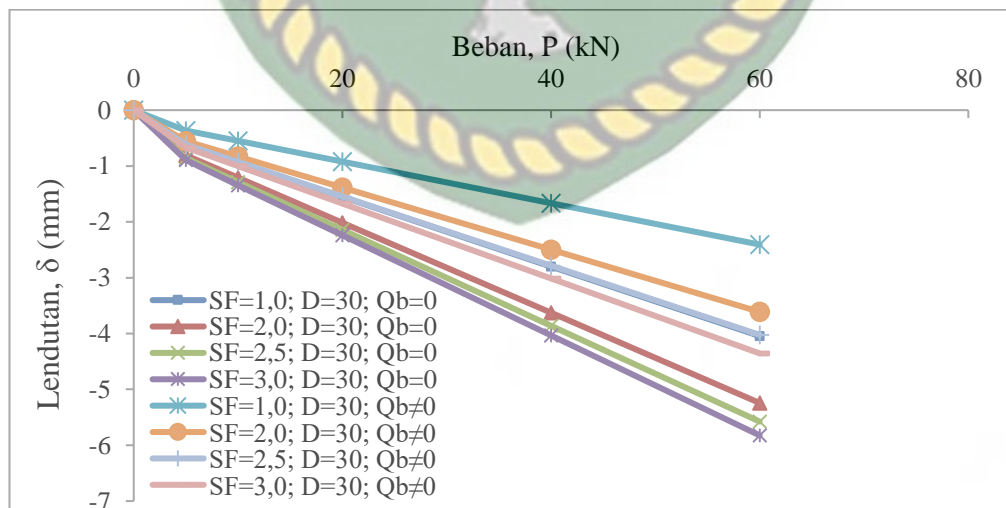
**Gambar 5.12** Hubungan antara  $P$ - $M$  dengan variasi faktor aman untuk  $Q_b \neq 0$  (a) Diameter 30 cm, (b) Diameter 40 cm, (c) Diameter 50 cm, (d) Diameter 60 cm

Dari Gambar 5.11 dan 5.12 dapat dilihat bahwa untuk semua ukuran diameter tiang pipa beton menghasilkan lendutan paling kecil pada penggunaan faktor aman ( $SF$ ) 1,0. Lendutan pelat semakin kecil dengan semakin besar diameter tiang. Semakin besar ukuran diameter tiang maka lendutan akibat beban 60 kN cenderung berkurang dan lebih rendah dari lenduta izin maksimum ( $\delta_a= 5$  mm) sedangkan lendutan untuk ( $Q_b \neq 0$ ) mempunyai lendutan pelat yang cenderung lebih kecil dari pada lendutan pada pelat saat ( $Q_b=0$ )

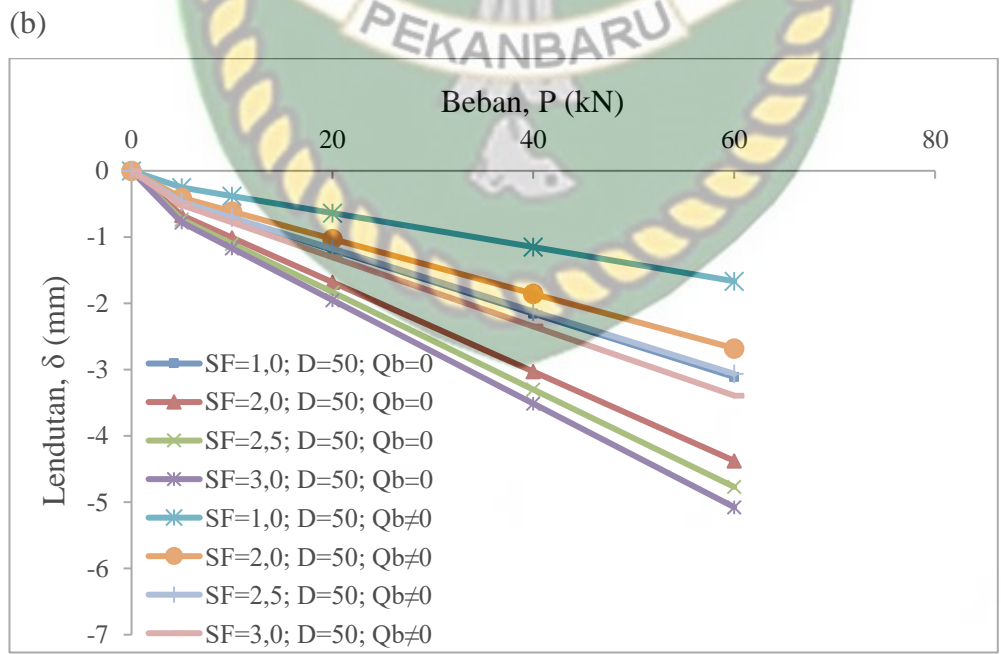
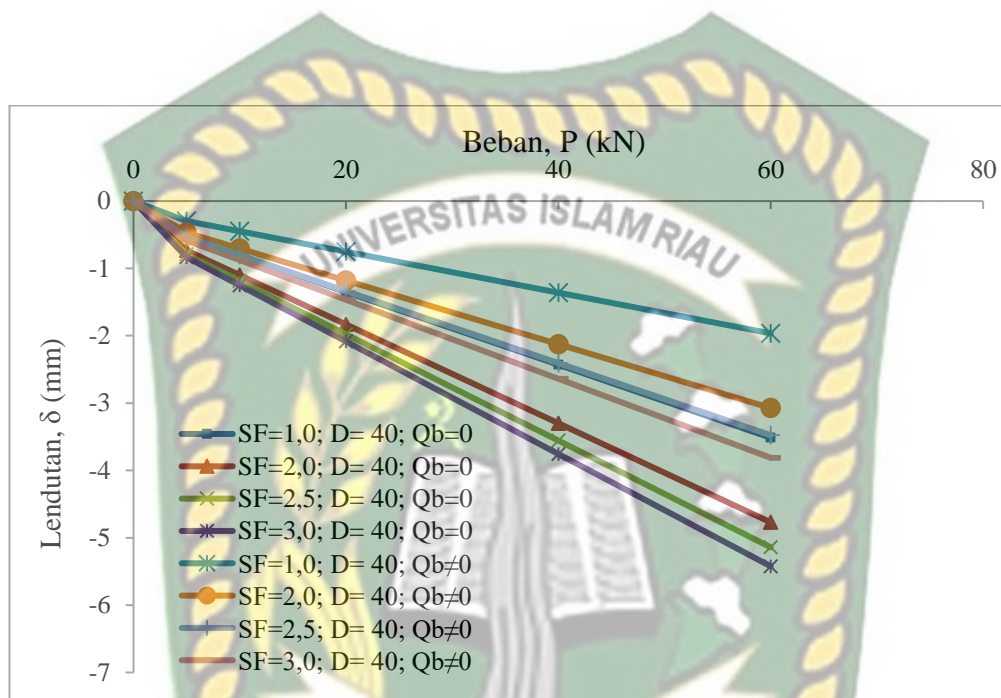
Hubungan beban dan momen ( $P-M$ ) dengan variasi faktor aman pada variasi diameter tiang untuk tiang pipa beton untuk ( $Q_b=0$ ) dan ( $Q_b \neq 0$ ) tidak mempunyai pengaruh terhadap momen pelat karena beban yang diasumsikan bekerja tegak lurus terhadap tiang.

#### 5.4.5 Perbandingan Lendutan dan Momen untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$

Perbandingan Lendutan dan moment untuk  $Q_b=0$  dan  $Q_b \neq 0$  yang ditampilkan pada grafik lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat ditunjukkan pada Gambar 5.13. Nilai lendutan diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer *SAP* 2000 versi 12. Berikut adalah lendutan pada pelat untuk ( $Q_b=0$ ) dan ( $Q_b \neq 0$ ) untuk variasi diameter tiang 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm dengan panjang tiang 1,5 m.

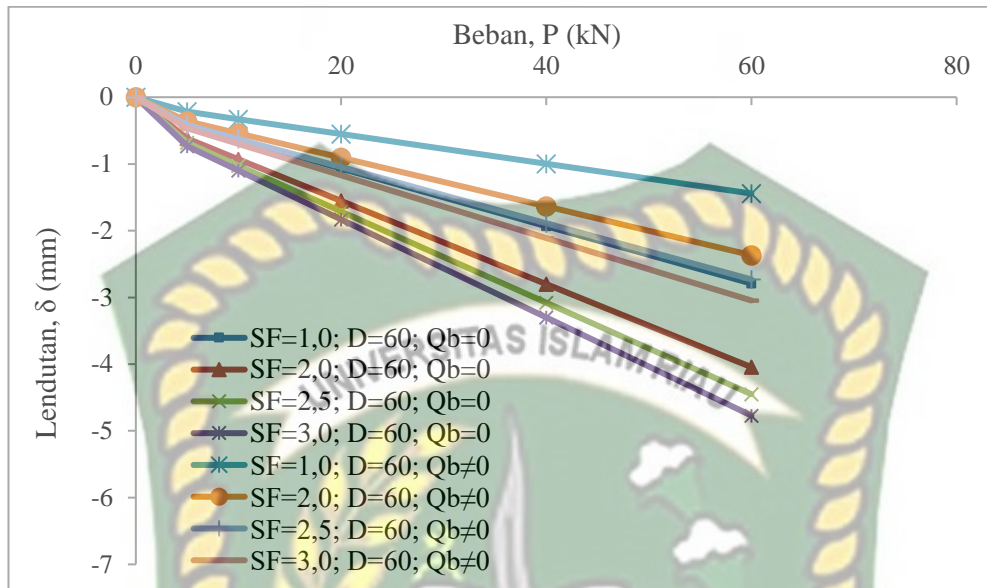


**Gambar 5.13** Hubungan  $P-\delta$  terhadap pengaruh variasi diameter dan faktor aman pada Lp 1,5 m untuk  $Q_b=0$  dan  $Q_b \neq 0$  (a) Diameter 30 cm, (b) Diameter 40 cm, (c) Diameter 50 cm dan (d) Diameter 60 cm



(c)

**Gambar 5.13** Lanjutan

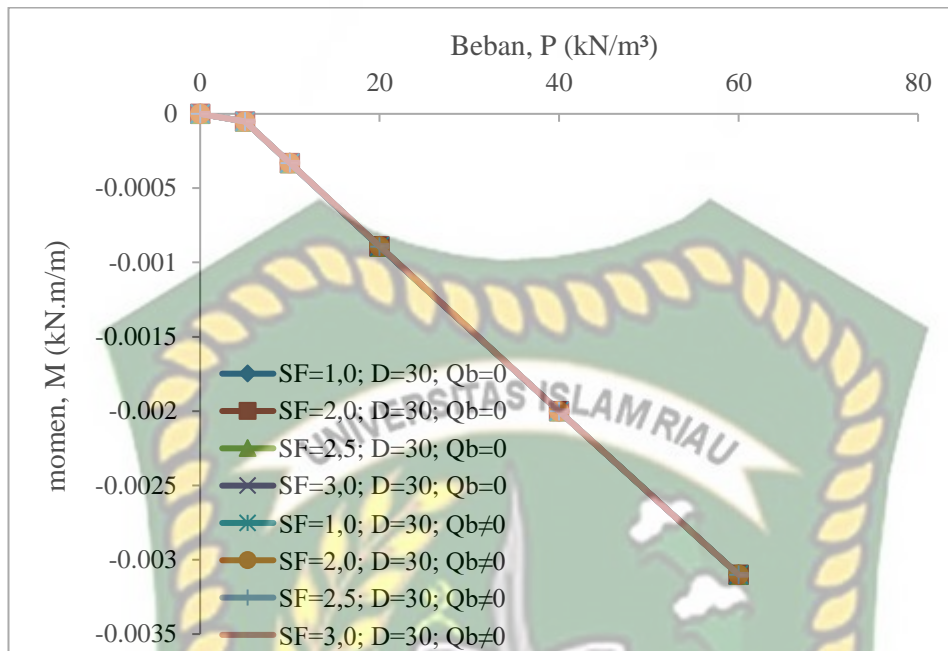


(d)

**Gambar 5.13** Lanjutan

Dari Gambar 5.13 dapat dilihat bahwa variasi diameter tiang berpengaruh terhadap lendutan yang terjadi pada pelat, semakin besar diameter tiang maka lendutan yang dihasilkan menjadi semakin kecil, perhitungan lendutan untuk tahanan ujung tiang tidak diperhitungkan ( $Q_b=0$ ) mempunyai nilai lendutan yang lebih besar, sedangkan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) mempunyai nilai lendutan lebih kecil. Semakin besar diameter tiang maka lendutan akibat beban 60 kN cenderung berkurang dan lebih rendah dari lendutan izin maksimum ( $\delta_a=5\text{mm}$ ).

Hubungan beban dan momen ( $P-M$ ) dengan variasi faktor aman dan variasi diameter tiang untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) ditampilkan pada Gambar 5.14.

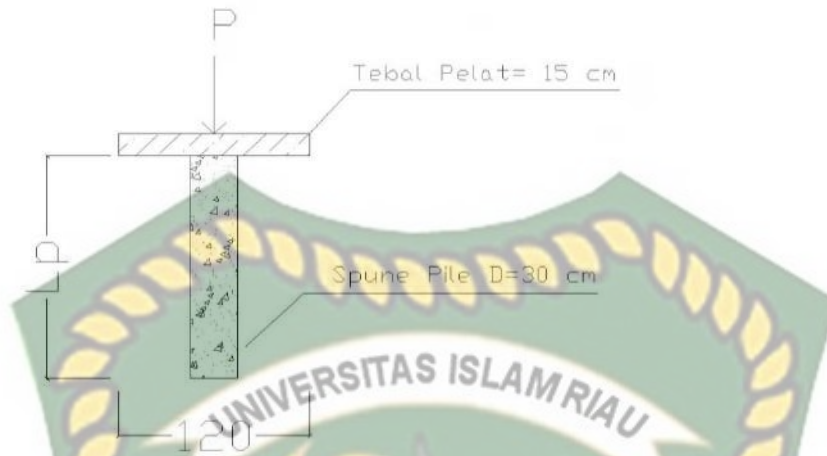


**Gambar 5.14** Hubungan  $P$ - $M$  tiang berdiameter 30 dengan panjang tiang 1,5 m untuk  $Q_b=0$  dan  $Q_b \neq 0$

Dari Gambar 5.14 hubungan beban dan momen ( $P$ - $M$ ) tiang berdiameter 30 dengan panjang tiang 1,5 m untuk  $Q_b=0$  dan  $Q_b \neq 0$  untuk tiang pipa beton menunjukkan variasi faktor aman dan variasi diameter tiang tidak mempunyai pengaruh terhadap momen pada pelat karena beban yang diasumsikan bekerja tegak lurus terhadap tiang.

### 5.5 Pengaruh Variasi Panjang Tiang untuk Diameter 30 cm

Penelitian ini juga menganalisis pengaruh variasi panjang tiang terhadap pola lendutan dengan memvariasikan faktor aman, panjang tiang yang digunakan yaitu 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m. Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan program komputer *SAP 2000* versi 12 yang mana analisis dihitung untuk tahanan ujung tiang di abaikan ( $Q_b=0$ ) dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ). Pola lendutan dihitung berdasarkan lendutan maksimum sebagai lendutan toleransi ( $\delta_a = 5\text{mm}$ ) ditinjau pada pembebanan ditengah pelat (Puri, 2015a).



**Gambar 5.15** Sketsa tiang pipa beton diameter 30 cm

**5.5.1 Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap  $\Delta k$  dan  $k'$  Saat  $Q_b=0$**

Variasi panjang tiang yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m, hasil perhitungan lendutan berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a = 5$  mm) ditinjau pada pembebanan di tengah pelat yaitu 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN. Berikut adalah tabel hasil perhitungan nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) untuk variasi panjang tiang dengan diameter 30 cm yang disajikan pada Tabel 5.6

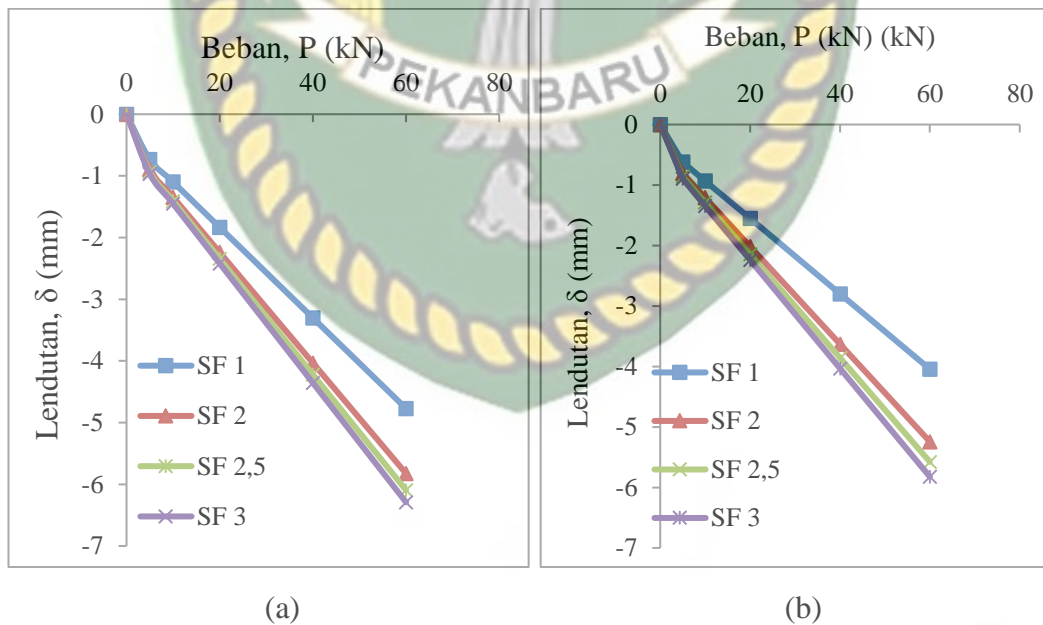
**Tabel 5.8** nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk  $Q_b=0$

Diameter (cm)	Lp (m)	SF	$\Delta k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k'$ (kN/m <sup>3</sup> )
30	1	1	2.634,98	7.134,98
		2	1.317,49	5.817,49
		2,5	1.053,99	5.553,99
		3	878,33	5.378,33
	1,5	1	3.952,48	8.452,48
		2	1.976,24	6.476,24
		2,5	1.580,99	6.080,99
		3	1.317,49	5.817,49
	2	1	5.269,97	9.769,97
		2	2.634,98	7.134,98
		2,5	2.107,99	6.607,99
		3	1.756,66	6.256,66

Dari Tabel 5.6 Hasil perhitungan berdasarkan  $\delta_a = 5$  mm pada pembebanan di tengah pelat saat  $Q_b = 0$ . Maka terlihat bahwa dengan meningkatnya angka faktor aman nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  menjadi semakin kecil. Jadi pada penggunaan faktor aman (SF) 1,0 memiliki nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  paling besar dibanding dengan faktor aman lainnya.

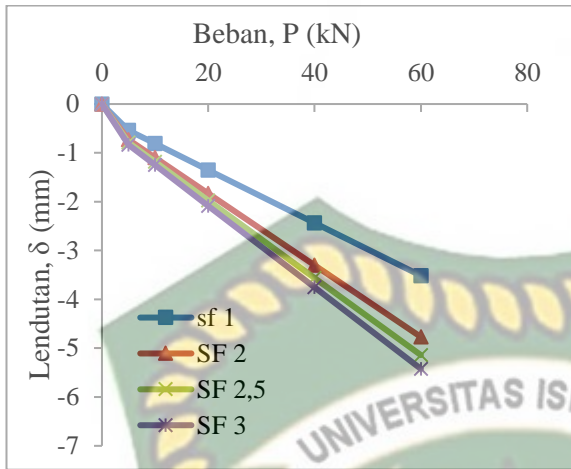
### 5.5.2 Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap Lendutan dan Momen ( $Q_b = 0$ )

Pengaruh variasi faktor aman dan variasi panjang tiang terhadap hasil lendutan dan momen untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b = 0$ ), hasil yang ditampilkan berupa grafik lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat. Nilai lendutan dan momen diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer SAP 2000 versi 12. Berikut adalah grafik hubungan antara beban dan lendutan yang disajikan pada Gambar 5.16 serta grafik hubungan antara beban momen dan momen yang disajikan pada Gambar 5.17.



**Gambar 5.16** Hubungan pengaruh  $P-\delta$  terhadap pengaruh variasi panjang dan faktor aman pada diameter tiang 30 cm untuk  $Q_b = 0$  (a)  $L_p$  1,0 m (b)  $L_p$  1,5 m, (c)  $L_p$  2,0 m



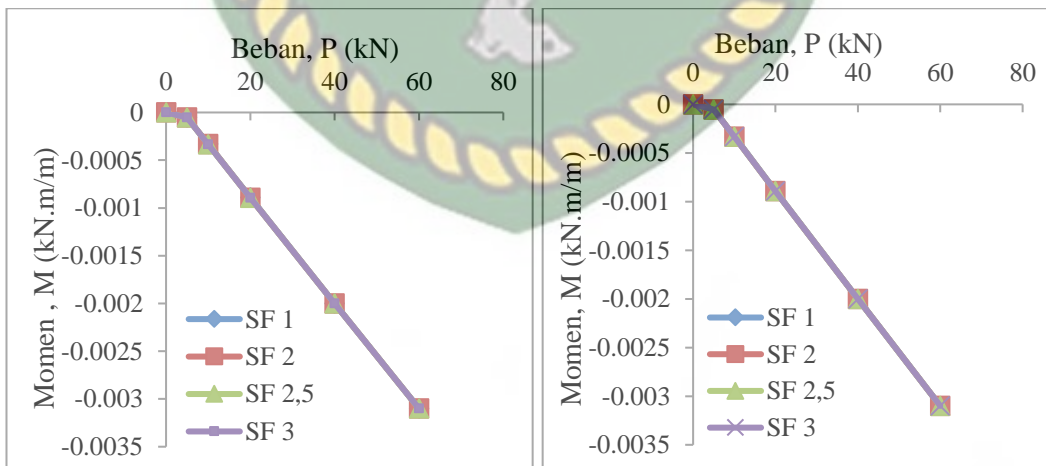


(c)

**Gambar 5.16 Lanjutan**

Dari Gambar 5.16 dapat dilihat bahwa penggunaan faktor aman ( $SF$ ) 1,0 memiliki lendutan paling kecil dari pada variasi faktor aman lainnya selain itu ukuran panjang tiang juga mempengaruhi pola lendutan yang didapat, karena semakin panjang tiang maka menyebabkan lendutan menjadi semakin berkurang.

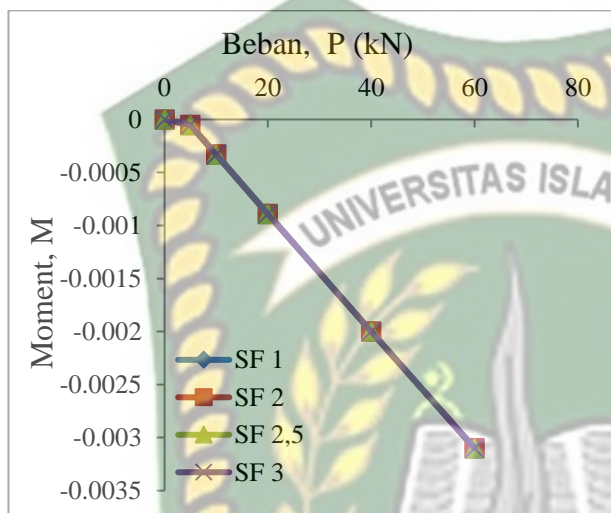
Hubungan beban dan momen ( $P-M$ ) dengan variasi faktor aman dan variasi diameter tiang untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) ditampilkan pada Gambar 5.17.



(a)

(b)

**Gambar 5.17** Hubungan pengaruh  $P$ - $M$  terhadap pengaruh variasi diameter dan faktor aman pada diameter tiang 30 cm untuk  $Q_b=0$  (a) Lp 1,0 m (b) Lp 1,5 m, (c) Lp 2,0m



(c)

**Gambar 5.17** Lanjutan

Hubungan beban dan momen ( $P$ - $M$ ) dengan variasi faktor aman pada variasi dimensi ukuran tiang untuk tiang pipa beton untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) tidak mempunyai pengaruh terhadap momen pelat karena beban yang diasumsikan bekerja tegak lurus terhadap tiang.

### 5.5.3 Pengaruh Variasi Diameter Tiang Terhadap $\Delta k$ dan $k'$ untuk $Q_b \neq 0$

Nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k'$ ) dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.20) dan tambahan nilai modulus reaksi *subgrade* ( $\Delta k$ ) juga dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.19). Variasi panjang tiang pipa beton yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m, hasil perhitungan lendutan berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a = 5$  mm) ditinjau pada pembebanan di tengah pelat yaitu 5 kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN. Berikut adalah tabel hasil perhitungan nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  untuk tahanan ujung taiang

diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) untuk variasi panjang tiang dengan diameter 30 cm yang disajikan pada Tabel 5.9

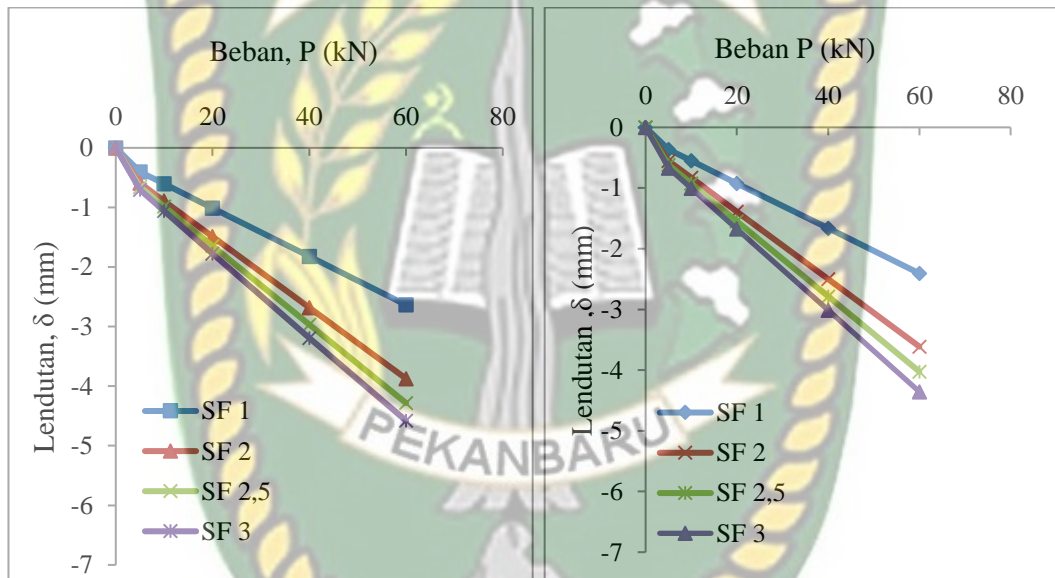
**Tabel 5.9** nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  saat  $Q_b \neq 0$

Diameter (cm)	Lp (m)	SF	$\Delta k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k'$ (kN/m <sup>3</sup> )
30	1	1	8.676,98	13.176,98
		2	4.338,49	8.838,49
		2,5	3.470,79	7.970,79
		3	2.892,33	7.392,33
	1,5	1	9.994,48	14.494,48
		2	4.997,24	9.497,24
		2,5	3.997,79	8.497,79
		3	3.331,49	7.831,49
	2	1	11.311,97	15.811,97
		2	5.655,98	10.155,98
		2,5	4.524,79	9.024,79
		3	3.770,66	8.270,66

Hasil perhitungan berdasarkan  $\delta_a = 5$  mm pada pembebanan di tengah pelat untuk  $Q_b \neq 0$ . Maka terlihat bahwa dengan meningkatnya angka faktor aman nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  menjadi semakin kecil. Jadi pada penggunaan faktor aman 1,0 memiliki nilai  $\Delta k$  dan  $k'$  paling besar dibanding dengan faktor aman lainnya.

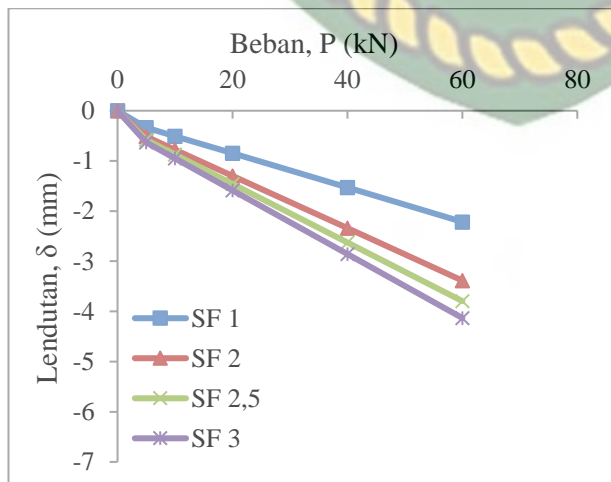
### 5.5.4 Pengaruh Variasi Panjang Tiang Terhadap Lendutan dan Momen ( $Q_b \neq 0$ )

Pengaruh variasi faktor aman dan diameter tiang terhadap hasil lendutan dan momen untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b \neq 0$ ), pola lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat ditunjukkan pada Gambar 5.17. Berikut adalah lendutan dan gaya dalam berupa momen pada pelat untuk  $Q_b \neq 0$ , variasi panjang tiang pipa beton tunggal 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m dengan diameter tiang pipa beton yaitu 30 cm. hasil analisis lendutan diperoleh dari analisis menggunakan bantuan program komputer SAP 2000 versi 12.



(a)

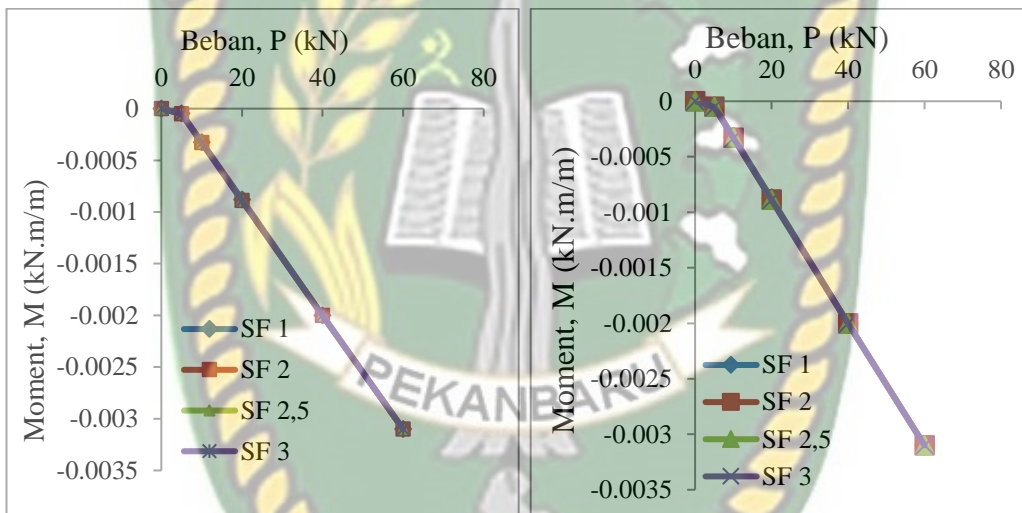
(b)



(c)

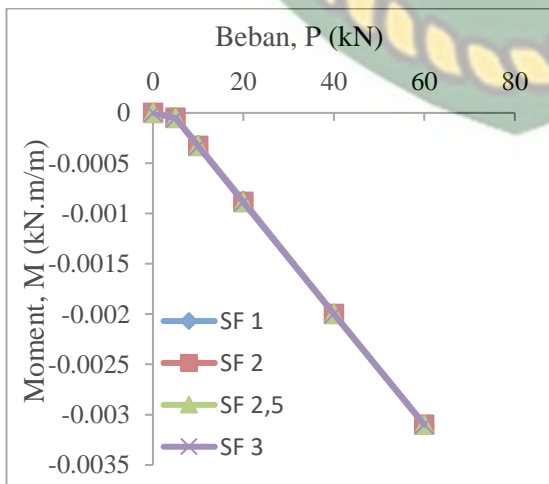
**Gambar 5.18** Hubungan  $P-\delta$  terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada diameter tiang 30 cm untuk  $Q_b \neq 0$  (a)  $L_p$  1,0 m (b)  $L_p$  1,5 m, (c)  $L_p$  2,0m

Dari gambar 5.18 dapat dilihat bahwa penggunaan faktor aman ( $SF$ ) 1,0 memiliki lendutan paling kecil dari pada variasi  $SF$  lainnya, selain itu ukuran panjang tiang juga mempengaruhi pola lendutan yang didapat, karena semakin panjang tiang juga menyebabkan lendutan menjadi semakin berkurang. Untuk hubungan beban dan momen dengan variasi faktor aman ( $SF$ ) disajikan pada Gambar 5.19



(a)

(b)



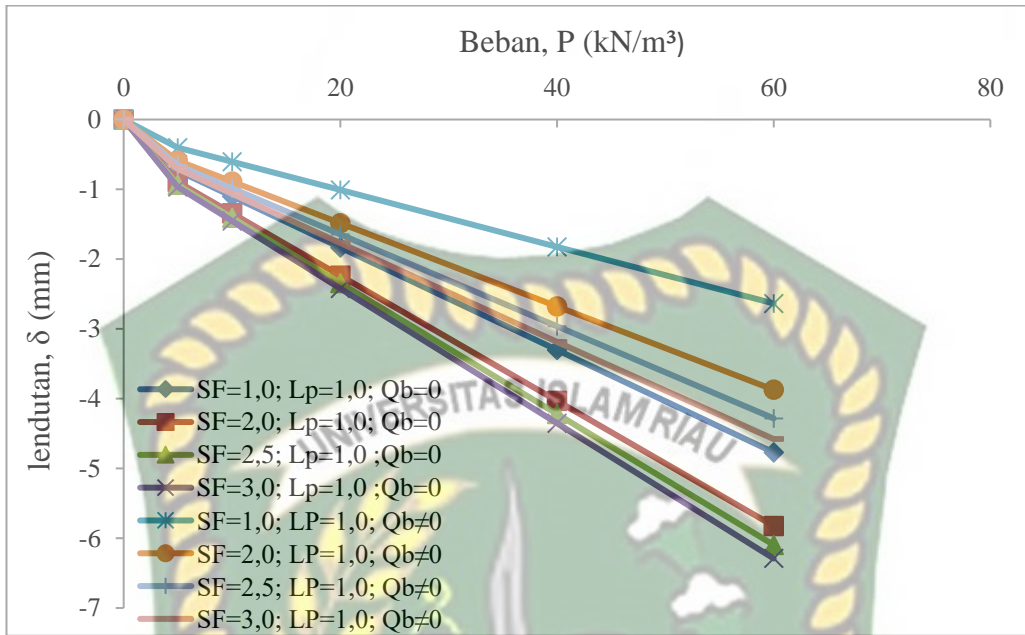
(c)

**Gambar 5.19** Hubungan  $P-M$  terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada diameter tiang 30 cm untuk  $Q_b \neq 0$  (a)  $L_p$  1,0 m (b)  $L_p$  1,5 m, (c)  $L_p$  2,0 m

Hubungan antara  $P-M$  dengan memvariasikan nilai faktor aman dan panjang tiang yang di analisis menggunakan bantuan program komputer *SAP* 2000 versi 12, dapat dilihat bahwa variasi faktor aman dan variasi panjang tiang tidak berpengaruh pada momen pelat karena beban yang diasumsikan bekerja tegak lurus terhadap tiang.

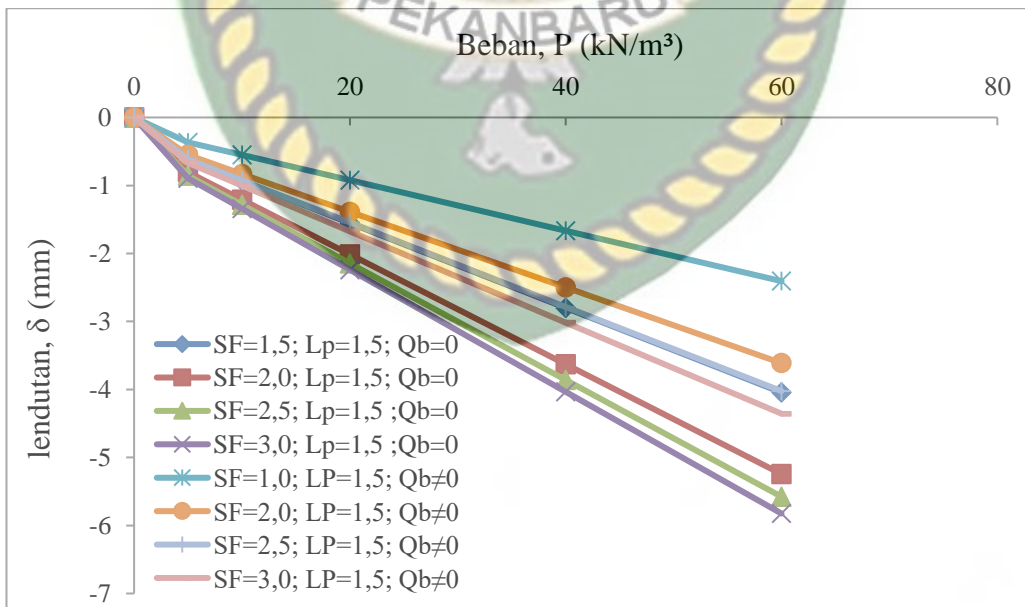
#### 5.5.5 Perbandingan Lendutan dan Momen untuk $Q_b=0$ dan $Q_b \neq 0$

Berikut akan ditampilkan grafik lendutan untuk variasi panjang tiang 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; dengan diameter 30 cm, grafik lendutan yang disajikan untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ). Grafik perbandingan hubungan  $P-\delta$  variasi panjang tiang dan variasi faktor aman pada tiang berdiameter 30 cm untuk tahanan ujung tiang diabaikan ( $Q_b=0$ ) dan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ), disajikan dalam Gambar 5.20

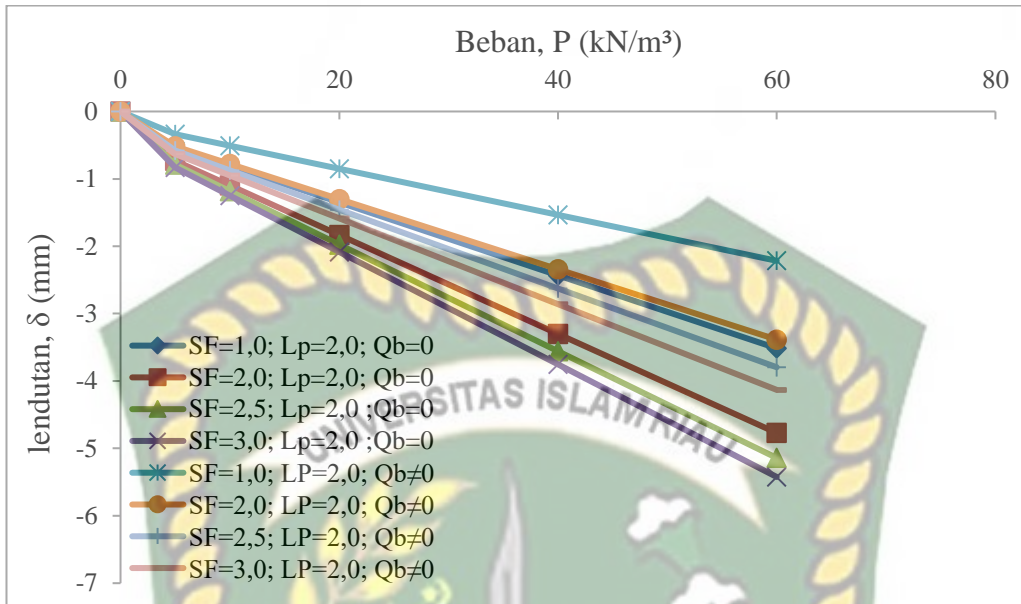


(a)

**Gambar 5.20** Hubungan  $P$ - $\delta$  terhadap pengaruh variasi panjang tiang dan faktor aman pada diameter tiang 30 cm untuk  $Q_b \neq 0$  (a) Lp 1,0 m (b) Lp 1,5 m, (c) Lp 2,0m



(b)

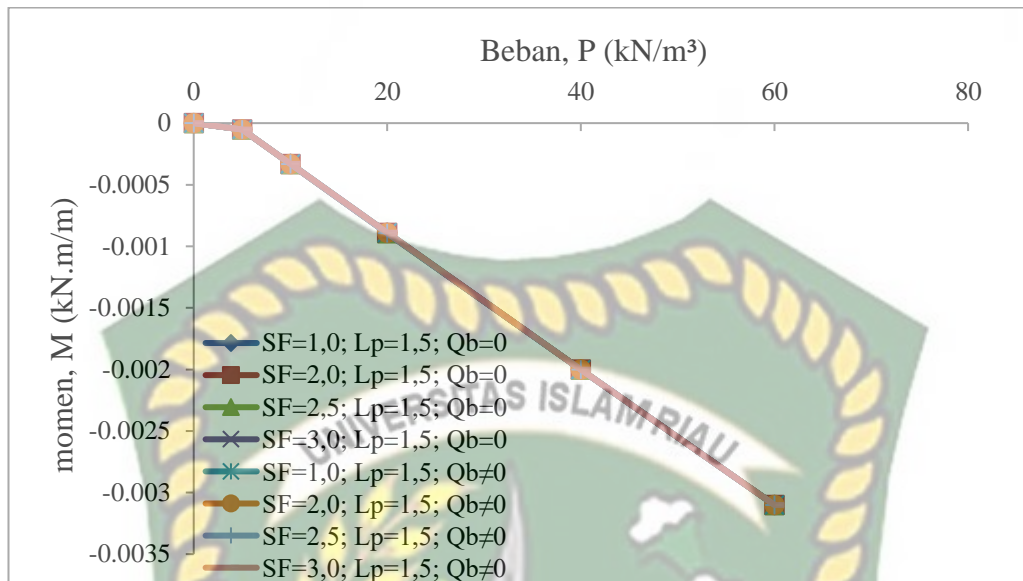


(c)

**Gambar 5.20 Lanjutan**

Dari Gambar 5.19 dapat dilihat bahwa variasi panjang tiang berpengaruh terhadap lendutan yang terjadi pada pelat, semakin panjang tiang yang digunakan maka lendutan yang dihasilkan menjadi semakin kecil, perhitungan lendutan untuk tahanan ujung tiang tidak diperhitungkan ( $Q_b=0$ ) mempunyai nilai lendutan yang lebih besar, sedangkan untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan mempunyai nilai lendutan lebih kecil ( $Q_b \neq 0$ ). Hubungan beban dan momen dengan variasi faktor aman, untuk grafik momen hanya ditampilkan untuk tiang dengan panjang 1,5 m karena variasi faktor aman dan variasi panjang tiang tidak berpengaruh pada momen pelat pada sistem pelat terpacu tiang pipa beton tunggal. Hubungan momen dan beban untuk tiang berdiameter 30 cm disajikan pada Gambar 5.21.





**Gambar 5.21** Hubungan beban dan momen tiang diameter 30 dengan anjang tiang 1,5 m untuk  $Q_b=0$  dan  $Q_b \neq 0$

Pada penelitian ini faktor aman berfungsi untuk mempengaruhi nilai modulus reaksi tanah dasar, semakin besar faktor aman maka modulus reaksi tanah dasar yang terjadi semakin kecil. Sedangkan untuk nilai lendutan berbanding lurus dengan faktor aman karena semakin besar faktor aman maka semakin besar lendutan yang terjadi.

Jadi dari semua grafik hubungan beban dan lendutan dapat disimpulkan bahwa variasi faktor aman mempengaruhi lendutan yang terjadi pada pelat karena semakin kecil nilai faktor aman maka lendutan yang dihasilkan akan semakin kecil juga. Begitu juga dengan variasi diameter tiang dan panjang tiang juga mempengaruhi lendutan yang terjadi pada pelat, apabila diameter tiang beton pipa diperbesar dan panjang tiang beton diperpanjang maka lendutan yang dihasilkan menjadi semakin kecil.

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

## 6.1 KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa besaran faktor aman mempengaruhi nilai lendutan pada hitungan. Lendutan hitungan meningkat dengan peningkatan faktor aman pada modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) metode Hardiyatmo Modifikasi (2012). Pada desain penelitian ini faktor aman berfungsi untuk mempengaruhi nilai modulus reaksi tanah dasar, semakin besar faktor aman maka modulus reaksi tanah dasar yang terjadi semakin kecil, sedangkan untuk lendutan berbanding lurus dengan faktor aman karena semakin besar faktor aman maka semakin besar lendutan yang terjadi. Penggunaan faktor aman 1,0 memiliki pola lendutan paling kecil. Variasi faktor aman tidak berpengaruh pada momen pelat karena posisi beban tepat di atas tiang.
2. Analisis lendutan pada tiang untuk tahanan ujung tiang diperhitungkan ( $Q_b \neq 0$ ) memiliki lendutan lebih kecil berdasarkan lendutan toleransi ( $\delta a = 5\text{mm}$ ) pada penggunaan faktor aman 1,0
3. Variasi diameter dan panjang tiang berpengaruh terhadap lendutan, karena semakin besar diameter dan panjang tiang maka semakin kecil lendutan yang terjadi pada pelat. Lendutan terbesar terjadi pada tiang berdiameter 30 cm dengan panjang tiang 1,5 m dengan nilai lendutan sebesar  $-5,82\text{ mm}$  saat  $Q_b=0$ , sedangkan lendutan paling kecil terjadi pada tiang berdiameter 60 cm dengan panjang tiang 1,5m dengan nilai lendutan sebesar  $-0,22$  saat  $Q_b \neq 0$ .

## 1.2 Saran

1. Perencanaan perkerasan sistem pelat terpaku dengan penerapan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ), untuk penelitian kedepannya dapat digunakan perhitungan dengan memperhitungkan tahanan ujung tiang ( $Q_b \neq 0$ ), karena lendutan yang dihasilkan lebih kecil berdasarkan lendutan toleransi ( $\delta a = 5\text{mm}$ ).
2. Pelat terpaku cocok digunakan pada struktur perkerasan jalan di atas tanah dasar lempung lunak.

3. Perhitungan lendutan dapat dikembangkan dengan menggunakan metode dan program lainnya seperti program Plaxis, ETABS, dan lain-lain.
4. Peneelitia selanjutnya dapat dicoba dengan melakukan uji di Laboratorium.



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

**Perpustakaan Universitas Islam Riau**

## DAFTAR PUSTAKA

- Afriliyani, N., Puri, A., Ardiansyah, R., 2017, "Penerapan Modulus Reaksi *Subgrade* Ekvivalen Metode Puri, dkk (2012) dalam Perhitungan Lendutan Pelat pada Perkerasan Sistem Cakar Ayam Modifikasi", Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP) 2017, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 9 Februari 2017, pp. 29-35.
- Agustin, D.R., Puri, A., Ardiansyah, R., 2017, "Perhitungan Lendutan Perkerasan Jalan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dengan Variasi Faktor Aman pada Tambahan Modulus Reaksi *Subgrade*", Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP) 2017, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 9 Februari 2017, pp. 76-84.
- Das, B.M., 2011. "*Principle of Foundation Engineering*", 7ed., Stamford : Cengage Learning.
- Dewi, D.A., 2009, "Kajian Pengaruh Tiang Tunggal Terhadap Nilai Koefisien Reaksi *Subgrade* Ekvivalen Pada Uji Beban Skala Penuh, *Tesis*", Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Diana, w., 2016, "Uji Model Skala Kecil dan Analisis Elemen Hingga Perkerasan Sistem Pelat Terpakai pada Tanah Dasar Ekspansif". Laporan Kemajuan Hibah Doktor, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia
- Dwijaya, P., "Distributor & Supplier Pipa Tiang Pancang", Surabaya. <http://pramanadwijaya.com/produk/pipa/tiang-pancang/>, diakses 22 Maret 2018.
- Hardiyatmo, H.C., 2008, "Sistem "Pelat Terpakai (*Nailed Slab*)" Untuk Perkuatan Pelat Beton Pada Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna dalam Penanganan Sarana - prasarana, MPSP JTSL FT UGM, pp. M-1 - M-7.
- Hardiyatmo, H.C., 2009, "Metoda Hitungan Pelat dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekvivalen untuk Struktur Pelat Fleksibel", sub mitted in *Dinamika Teknik*.
- Hardiyatmo, H.C., 2011, "Method to Analyze the Deflection of the Nailed-Slab System", *International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, Volume 11 Number 4, pp.22-28.
- Hardiyatmo, H.C., 2015, "Analisis & Perancangan Fondasi", Gajah Mada University Press, Yogyakarta, Indonesia.

- Muhu, H.L.Y., 2007, “Kajian Lendutan Pada Sistem Cakar Ayam Akibat Variasi Lebar Pelat (Model Sistem Cakar Ayam dari Pelat Baja)”, *Tugas Akhir*, Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Oktavia, F., Puri, A., Mildawati, R., 2019, “Analisis Variasi Faktor Aman Modulus Reaksi Tanah Dasar Sistem Pelat Terpaku Tiang Mini Beton Masif Tunggal pada Lempung Lunak”, *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP) 2019*, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 17 Oktober 2018, pp. 8-18.
- Panduan Geoteknik Indonesia, 2001, “Panduan Geoteknik 1 : Proses Pembentukan dan Sifat-sifat Dasar Tanah Lunak”, Pusat Litbang Prasarana Transportasi, Bandung, [sni.litbang.pu.go.id](http://sni.litbang.pu.go.id), diakses 15 September 2018.
- Perkasa, B.E, “Precast and Prestress Concrete”, 2018, Bandung, [www.beton.co.id](http://www.beton.co.id), diakses 22 Februari 2019.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’i, A., 2011b, “Contribution of Wall Barrier to Reduce the Deflection of Nailed-Slab System in Soft Clay”, *Proc. of 9<sup>th</sup> Indonesian Geotech. Conf. and 15<sup>th</sup> Annual Scientific Meeting (KOGEI IX & PIT XV) HATTI, HATTI, Jakarta*, 7-8 December 2011, pp. 299-306 (in Indonesian).
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’i, A., 2012a, “Determining Additional Modulus of Subgrade Reaction Based on Tolerable Settlement for the Nailed-slab System Resting on Soft Clay”, *IJCEE-IJENS*, Vol. 12 No. 3 (2012) 32-40. <http://ijens.org/IJCEE%20Vol%201%20Issue%2003.html> diakses 15 September 2018.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’i, A., 2012b, “Application of the Additional Modulus of Subgrade Reaction to Predict the Deflection of Nailed-slab System Resting on Soft Clay Due to Repetitive Loadings”, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahun ke-16 (PIT) HATTI, Jakarta*, 4 December, Indonesia, pp. 217.222.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’i, A., 2013, “ Penerapan Metode Analisis Lendutan Pelat Terpaku Pada Model Skala Penuh dan Komparasi dengan Uji Pembebanan”, *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTeKS7)*, Universitas Negeri Sebelas Maret, Surakarta, 24-26 October 2013, pp. G201-211.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’i, A., 2014, “Behavior of Nailed-Slab System on Soft Clay Due to Repetitive Loadings by Conducting Full Scale Test”, *Proc. 17<sup>th</sup> Intrntl. Symp. FSTPT*, University of Jember, pp.739-750.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’i, A., 2015, “Perilaku Perkerasan Sitem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Lempung Lunak”, *Prosiding*

*Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS) 2015*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 12 Nopember 2015, ISSN 2477-0086, pp. 7-17.

- Puri, A., 2015a, “Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Lempung Lunak”, *Disertasi*, Program Doktor Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Puri, A., 2015b, “Validasi Metode Analisis Lendutan Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Model Skala Penuh dengan Satu Baris Tiang”, *Prossiding PIT XIX dan KOGEI X*, HATTI, pp. 453-464, (ISBN 978-602-17221-3-8)
- Puri, A., 2015c, “Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Lunak”, *Proceeding 1<sup>st</sup> Annual Civil Engineering Seminar (ACES)*, pp. 305-313, (ISBN 978-979-792-636-6).
- Puri, A., 2017, “Effect Of Safety Factors On The Calculated Deflection Of 1-Pile Row Full Scale Nailed-Slab Pavement System Resting On Soft Clay Due To Concentric Loadings”, *Proceeding 1st International Conference of Science Engineering Technology (ICoSET)*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 8-9 November 2017.
- Puri, A., 2017, “Developing the Curve of Displacement Factor for Determination The Additional Modulus of Subgrade Reaction on Nailed-slab Pavement System”, *International Journal of Technology (IJTech)*, Vol. 8 No. 1 (2017) 124-133. ISSN 2086-9614. <http://ijtech.eng.ui.ac.id/article/view/232>, diakses 15 September 2018.
- Setiawan, B., 2015, “Perilaku Sistem Cakar Ayam Modifikasi Pada Tanah Ekspansif”, *Disertasi*, Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana UGM Yogyakarta, Indonesia.
- Suhendro, B., 2000a, *Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya*, Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Young, W.C., Budynas, R.G., 2002, “Roark’s Formula for Stress and Strain”, 7<sup>th</sup> ed New York: McGraw-Hill.