

**Pengaruh Faktor Aman Global Modulus Reaksi Subgrade Ekuivalen Izin Terhadap Lendutan Sistem Pelat Terpaku Tiga Baris Tiang*****Effects of Global Safety Factor of Allowable Equivalent Modulus of Subgrade Reaction on Deflection of 3-Rows Pile Nailed-Slab System*****Ferly Oktavia<sup>1\*</sup>, Anas Puri<sup>2</sup>, Elizar<sup>3</sup>**<sup>1,2,3</sup> Program Studi Magister Teknik Sipil - Program Pascasarjana - Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia

Alamat korespondensi: Jl. Kaharuddin Nasution No. 113, Pekanbaru

email: [1ferly\\_oktavia@student.uir.ac.id](mailto:1ferly_oktavia@student.uir.ac.id)\*; [2anaspuri@eng.uir.ac.id](mailto:2anaspuri@eng.uir.ac.id); [3elizar@eng.uir.ac.id](mailto:3elizar@eng.uir.ac.id)**Abstract**

*The Nailed-slab System is a rigid pavement system consisting of slab and piles that have been installed under the slab and are connected monolithically. In previous research, a single pile Nailed-slab using an allowable equivalent subgrade reaction modulus obtained quite high deflection results. Therefore, this research was conducted to determine the behavior of deflection of three-row piles using an allowable equivalent subgrade reaction modulus with variations in global safety factors. This study used secondary data from the results of a full-scale test of Nailed-slab System pavement for repetitive compressive loads. The allowable equivalent modulus of subgrade reaction ( $k'a$ ) with variations in SFG (1.0; 2.0; 2.5; 3.0). The allowable deflection is determined using the observed deflection and the maximum allowable deflection. The resistance of the pile tip was ignored because it is in soft soil. The deflection of the plates was analyzed using the BoEF (Beam on Elastic Foundation) method by using the "BoEF.xls" Program version 1.4. The results of the analysis show that the global safety factor (SFG) affects plate deflection. The deflection increases with increasing SFG at the allowable equivalent modulus of subgrade reaction ( $k'a$ ). This study shows that the design using the approach used is safer, where the calculated results tend to be greater when compared with the observed deflection. These results show that the system can be applied in the field.*

**Keywords:** Global Safety Factor; Deflection; Nailed-Slab; Subgrade Reaction**Abstrak**

Sistem Pelat Terpaku merupakan sistem perkerasan kaku yang terdiri dari pelat dan tiang-tiang yang dipasang di bawahnya dan dihubungkan secara monolit. Dalam penelitian sebelumnya, Pelat Terpaku tiang tunggal menggunakan modulus reaksi subgrade ekuivalen izin dan diperoleh hasil lendutan yang cukup tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku lendutan Pelat Terpaku tiga baris tiang menggunakan modulus reaksi subgrade ekuivalen izin dengan variasi faktor aman global (SFG). Penelitian ini menggunakan data sekunder dari hasil uji skala penuh perkerasan Sistem Pelat Terpaku terhadap beban tekan pembebanan repetitif. Nilai modulus reaksi subgrade ekuivalen izin ( $k'a$ ) dengan variasi SFG (1,0; 2,0; 2,5; 3,0). Lendutan izin ditentukan menggunakan lendutan pengamatan dan lendutan izin maksimum. Tahanan ujung tiang diabaikan karena berada pada tanah lunak. Lendutan pelat dianalisis menggunakan metode BoEF (Beam on Elastic Foundation) dengan bantuan program "BoEF.xls" Program versi 1.4. Hasil analisis menunjukkan bahwa besaran faktor aman global (SFG) mempengaruhi lendutan pelat. Lendutan meningkat dengan meningkatnya SFG pada modulus reaksi subgrade ekuivalen izin ( $k'a$ ). Studi ini menunjukkan bahwa desain menggunakan pendekatan yang digunakan lebih aman, dimana hasil hitungan cenderung lebih besar bila dibandingkan dengan lendutan pengamatan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat diaplikasikan di lapangan.

**Kata Kunci:** Faktor Aman Global; Lendutan; Pelat Terpaku; Reaksi Subgrade

Please cite this article as:

Oktavia, F., Puri, A., & Elizar. (2023). Pengaruh Faktor Aman Global Modulus Reaksi Subgrade Ekuivalen Izin Terhadap Lendutan Sistem Pelat Terpaku Tiga Baris Tiang. *Media Teknik Sipil*, 21(2), 39-48. <https://doi.org/10.22219/jmts.v21i1.25869>

## PENDAHULUAN

Perkerasan kaku di atas tanah lunak mengakibatkan terjadinya penurunan yang tidak seragam. Ini terjadi karena distribusi beban yang tidak merata pada permukaan perkerasan dan beban akibat temperatur yang menyebabkan perkerasan mengalami momen lentur bolak balik (Puri et al., 2015). Sehingga terjadi kerusakan seperti *crack* dan *pumping* pada perkerasan. Oleh sebab itu, Hardiyatmo (2016) serta Puri dan Toyeb (2020) mengusulkan Sistem Pelat Terpaku sebagai solusi untuk menyelesaikan masalah kerusakan tersebut dan perkerasan dapat diaplikasikan pada tanah lunak.

Menurut Puri et al. (2015), Sistem Pelat Terpaku cocok digunakan untuk perkerasan yang tanah dasarnya dipengaruhi oleh penurunan tidak seragam, karena interaksi tanah-tiang-pelat membuat pelat lebih kaku, sehingga mengurangi terjadinya beda penurunan permukaan perkerasan. Pelat dan tiang dipasang secara monolit, yaitu tiang diikat dengan tulangan dan di cor bersamaan dengan pelat. Menurut Waruwu et al. (2020) dan Puri (2019), tiang yang diikat secara monolit dengan pelat menghasilkan penurunan yang lebih kecil dan pelat lebih stabil dalam menerima beban.

Hardiyatmo (2011) telah melakukan penelitian tentang metode untuk menganalisis lendutan Sistem Pelat Terpaku. Penelitian ini bertujuan menunjukkan metode untuk menganalisis lendutan pelat yang didukung oleh tiang pancang akibat adanya beban titik. Tiang pancang yang digunakan merupakan tiang friksi, dimana kapasitas dukung tiang hanya mengandalkan tahanan gesek karena berada pada tanah lunak (Puri et al., 2019). Oleh sebab itu, tiang yang dipasang di tanah dapat meningkatkan nilai modulus reaksi *subgrade*. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) dinyatakan sebagai jumlah modulus reaksi *subgrade* ( $k$ ) yang diperoleh dari beban uji pelat dan uji pembebanan pada pelat yang didukung oleh tiang ( $\Delta k$ ). Analisis lendutan Sistem Pelat Terpaku dilakukan dengan menerapkan teori balok pada fondasi elastis (BoEF). Hasil analisis menunjukkan bahwa metode yang diusulkan untuk memperkirakan lendutan cukup sesuai dengan data yang diamati.

Puri et al. (2012b) telah melakukan penelitian dengan menggunakan suatu

pendekatan untuk menentukan modulus tambahan reaksi *subgrade* akibat adanya tiang ( $\Delta k$ ). Reduksi tahanan tiang merupakan salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam menentukan  $\Delta k$ . Termasuk hubungan perpindahan antara tiang dan tanah. Sebenarnya, penentuan reduksi tahanan tiang untuk tujuan desain adalah sulit. Oleh sebab itu, diusulkan pendekatan dimana tahanan gesek tiang dimobilisasi sepenuhnya dan mempertimbangkan penurunan toleransi dari perkerasan kaku. Ini bertujuan untuk memudahkan dalam mendesain sistem Pelat Terpaku. Hasil penelitian berdasarkan analisis satu baris tiang menunjukkan bahwa sistem yang dirancang memberikan desain yang lebih aman. Pendekatan yang diusulkan ini menjadi salah satu teori yang digunakan dalam penelitian, sehingga hasil yang diperoleh sesuai dengan pengamatan.

Kemudian, Puri et al. (2013) melakukan penelitian tentang Sistem Pelat Terpaku tiga baris tiang dengan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen. Puri et al. (2014) juga melakukan penelitian tentang perilaku Sistem Pelat Terpaku pada tanah lempung lunak akibat beban repetitif dengan melakukan uji skala penuh. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku Sistem Pelat Terpaku akibat beban repetitif dan kemungkinan pengaplikasiannya di lapangan. Pelat terpaku skala penuh dibangun pada tanah lempung lunak dengan dimensi pelat berukuran 6,00 m x 3,54 m x 0,15 m dan 15 buah tiang mikro (diameter 0,20 m, panjang 1,50 m) sebagai pengaku pelat yang dipasang di bawah pelat. Tiang-tiang dan pelat dihubungkan secara monolit dan dilengkapi dengan dinding penahan tepi pada kedua ujung pelat. Sistem ini dibebani dengan beban repetitif dan dipasangkan instrumen di atas pelat berupa *pressure meter* dan *dial gauge*. Uji pembebanan dengan beban repetitif diberikan secara bertahap, sebesar  $P = 0$ ,  $P = 5$  kN, 10 kN, 20 kN, 40 kN, 80 kN, dan 160 kN atau empat kali beban rencana *single wheel* untuk jalan raya (40 kN). Perilaku lendutan pelat akibat beban menunjukkan bentuk yang *smooth*, yang berarti semua tiang mampu memberikan respon yang sama dalam bentuk 3D. Sistem ini memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap vibrasi, sehingga menjanjikan untuk aplikasi di lapangan.

Dimensi tiang memberikan pengaruh terhadap peningkatan kinerja Sistem Pelat

Terpaku dimana lendutan semakin berkurang dengan semakin besarnya dimensi tiang. Walaupun lendutan hitungan cenderung meningkat dengan peningkatan faktor aman pada tambahan modulus reaksi subgrade ekuivalen, namun momen hitungan pada pelat cenderung konstan (Oktavia et al., 2018).

Selanjutnya, Puri et al. (2021) melakukan penelitian Sistem Pelat Terpaku tiang tunggal dan satu baris tiang dengan modulus reaksi subgrade ekuivalen izin dengan memodifikasi tambahan modulus reaksi subgrade Metode Hardiyatmo. Faktor aman tambahan modulus reaksi subgrade karena adanya tiang ditetapkan sebagai 1,0, sedangkan modulus reaksi subgrade ekuivalen ( $k'$ ) dibagi dengan faktor aman secara keseluruhan yang disebut faktor aman global ( $SF_G$ ). Sehingga modulus reaksi subgrade ekuivalen ( $k'$ ) pada penelitian sebelumnya menjadi modulus reaksi subgrade ekuivalen izin ( $k'_a$ ). Lendutan pelat dihitung menggunakan *Beam on Elastic Foundation* (BoEF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa lendutan pelat yang dihitung sesuai dengan lendutan pengamatan. Meningkatkan faktor aman global akan menghasilkan perkiraan lendutan pelat yang berlebihan. Ini berarti desain dengan menggunakan modulus reaksi subgrade ekuivalen izin cenderung menghasilkan zona aman.

Pada praktiknya, Sistem Pelat Terpaku terdiri dari beberapa tiang sebagai penyangga pelat. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis Sistem Pelat Terpaku dengan tiga baris tiang. Analisis ini ditujukan untuk mengetahui perilaku lendutan Pelat Terpaku tiga baris tiang menggunakan modulus reaksi subgrade ekuivalen izin dengan variasi faktor aman global ( $SF_G$ ). Nilai faktor aman global ( $SF_G$ ) divariasikan yaitu 1,0; 2,0; 2,5; dan 3,0. Oleh karena ujung tiang berada pada tanah lunak, maka tahanan ujung tiang ( $Q_b$ ) diabaikan.

## METODE PENELITIAN

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

Modulus reaksi subgrade ekuivalen ( $k'$ ) pada Sistem Pelat Terpaku merupakan modulus reaksi subgrade dengan memperhatikan kontribusi tiang untuk menahan gesekan perpindahan vertikal pelat. Hardiyatmo (2011) telah mengusulkan metode untuk menentukan tambahan modulus reaksi dari tiang ( $\Delta k$ ) yang kemudian disederhanakan (Puri et al., 2012a) dengan

mempertimbangkan penurunan izin dari perkerasan. Pendekatan modulus ini ditentukan dari akumulasi modulus reaksi subgrade ( $k$ ) dan tambahan modulus reaksi subgrade karena tiang ( $\Delta k$ ), dihitung dengan persamaan 1 (Hardiyatmo, 2011; Puri et al., 2013):

$$k' = k + \Delta k \tag{1}$$

dengan  $k'$  adalah modulus reaksi subgrade ekuivalen pelat terpaku ( $\text{kN/m}^3$ ),  $k$  adalah modulus reaksi subgrade dari tanah ( $\text{kN/m}^3$ ), dan  $\Delta k$  adalah tambahan modulus reaksi subgrade karena adanya tiang ( $\text{kN/m}^3$ ).

### Modulus Reaksi Sugrade ( $k$ )

Modulus reaksi subgrade diperoleh dari koreksi terhadap koefisien reaksi subgrade ( $k_v$ ). Koefisien reaksi subgrade merupakan perbandingan antara tekanan tanah dan lendutan. Koefisien ini dapat digunakan dalam analisis lendutan pelat (Puri et al., 2013). Koefisien reaksi subgrade dirumuskan pada persamaan 2:

$$k_v = \frac{q}{\delta} \tag{2}$$

dengan  $q$  adalah tekanan tanah ( $\text{kN/m}^2$ ) dan  $\delta$  adalah lendutan yang terjadi (m).

Koefisien reaksi subgrade arah vertikal ( $k_v$ ) dapat digunakan dalam menganalisis lendutan, yaitu sebagai tekanan fondasi ( $q$ ) dibagi dengan penurunan bersesuaian ( $\delta$ ) tanah di bawahnya. Ini berarti bahwa reaksi subgrade adalah distribusi reaksi tanah di bawah fondasi untuk melawan beban fondasi.

Koefisien reaksi subgrade ( $k_v$ ) biasanya harus dikoreksi terhadap ukuran dan bentuk pelat terpaku, karena uji beban pelat menggunakan pelat lingkaran (Puri et al., 2012a). Menurut Puri et al. (2015), koreksi ukuran pelat (Das, 2016) dihitung dengan persamaan 3:

$$k_v = k_{v0,3} \left[ \frac{0,3}{B} \right] \tag{3}$$

Koreksi terhadap bentuk pelat menggunakan persamaan 4 (Das, 2016):

$$k_v = \frac{k_{(BxB)} \left( 1 + \frac{0,5 B}{L} \right)}{1,5} \tag{4}$$

dengan,  $k$  adalah modulus reaksi tanah dasar dengan lebar  $B$  ( $\text{kN/m}^3$ ),  $k_{v,0,3}$  adalah modulus reaksi tanah dasar pelat beban  $0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$  ( $\text{kN/m}^3$ ),  $B$  adalah lebar pelat (m),  $k_{(B \times B)}$  adalah modulus reaksi tanah dasar pelat beban  $B \times B$  ( $\text{kN/m}^3$ ),  $L$  adalah panjang pelat (m).

**Tambahan Modulus Reaksi Subgrade ( $\Delta k$ ) Metode Hardiyatmo Modifikasi**

Tambahan kekuatan tanah karena tiang dipengaruhi oleh tahanan tiang yang termobilisasi (Hardiyatmo, 2011). Ini ditinjau dari keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada pelat beban (lingkaran) yang didukung oleh tiang. Metode ini dimodifikasi (Puri et al., 2012b) sedemikian rupa sehingga nilai modulus reaksi subgrade ekuivalen dapat ditentukan. Tambahan modulus reaksi subgrade ( $\Delta k$ ) ditentukan (Puri et al., 2015) dengan metode Hardiyatmo Modifikasi, seperti Persamaan 5:

$$\Delta k = \frac{f_s A_s}{SF \delta_a A_{ps}} \tag{5}$$

dengan,  $f_s$  adalah tahanan gesek satuan tiang ( $\text{kN/m}^2$ ),  $A_s$  adalah luas selimut tiang ( $\text{m}^2$ ),  $\delta_a$  adalah toleransi penurunan pelat perkerasan kaku sebesar 5 (mm),  $A_{ps}$  adalah luasan zona pelat yang didukung oleh satu tiang ( $\text{m}^2$ ), dimana  $A_{ps} = s^2$ ,  $SF$  adalah faktor aman.

Dilihat dari persamaan (5), faktor aman hanya dihitung untuk tambahan modulus reaksi subgrade. Sedangkan dalam penelitian ini,  $SF$  akan dipertimbangkan untuk semua modulus reaksi, seperti persamaan 6:

$$k'_a = \frac{k'}{SF_G} \tag{6}$$

atau seperti persamaan 7 :

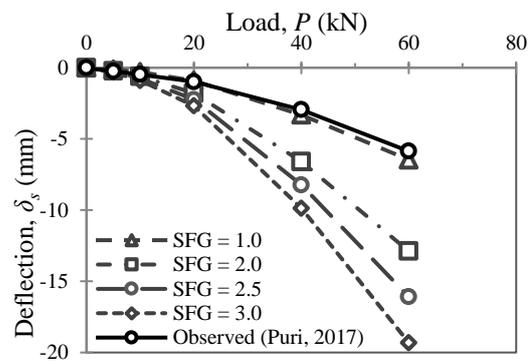
$$k'_a = \frac{k + \Delta k_m}{SF_G} \tag{7}$$

dimana  $k'_a$  adalah modulus reaksi subgrade ekuivalen izin ( $\text{kN/m}^3$ ),  $SF_G$  adalah faktor aman global,  $\Delta k_m$  adalah tambahan modulus reaksi subgrade modifikasi ( $\text{kN/m}^3$ ).

Tambahan modulus reaksi subgrade ( $\Delta k$ ), dimodifikasi (Puri et al., 2021) sebagai tambahan modulus reaksi subgrade modifikasi ( $\Delta k_m$ ), seperti persamaan 8:

$$\Delta k_m = \frac{f_s A_s}{\delta_a A_{ps}} \tag{8}$$

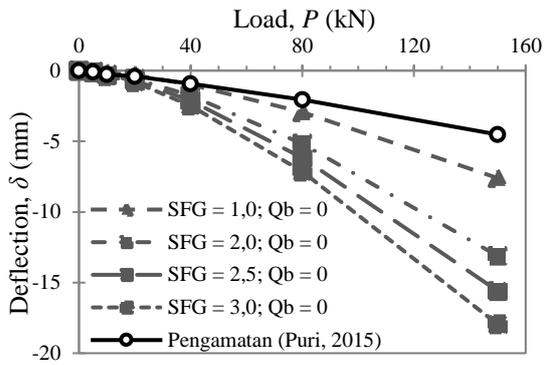
Analisis Sistem Pelat Terpaku tiang tunggal dengan variasi faktor keamanan global ( $SF_G$ ) modulus reaksi subgrade ekuivalen izin ( $k'_a$ ) dengan mengabaikan tahanan ujung tiang ( $Q_b=0$ ) telah dilakukan (Puri et al., 2021) dengan menggunakan persamaan (8), dan diperoleh hasil hubungan  $P-\delta$  seperti Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan  $P-\delta$  Pelat Terpaku tiang tunggal dengan variasi faktor aman global ( $SF_G$ ) (Puri et al., 2021).

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa lendutan pelat dengan variasi  $SF_G$  cenderung *overestimated* dengan meningkatnya  $SF_G$ . Selain itu, perilaku kurva  $P-\delta$  yang berada pada zona elastis-plastis juga melemah. *Overestimate* yang terjadi untuk  $SF_G= 3,0$  pada beban maksimum yaitu sekitar 229%. Ini berarti, semakin besar faktor aman maka desain yang dihasilkan semakin aman, namun harus memperhatikan efisiensi desain.

Kemudian, penelitian ini dilanjutkan dengan modulus reaksi subgrade ekuivalen izin pada pelat terpaku satu baris tiang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa lendutan pelat terpaku satu baris tiang cenderung *overestimated*. Semakin tinggi  $SF_G$ , maka semakin besar lendutan pelat. Begitupun lendutan yang terjadi karena peningkatan beban. Beban maksimum pada pelat terpaku satu baris tiang adalah 150 kN dengan *overestimate* terbesar sekitar 206% pada  $SF_G = 3,0$ . Namun, pada beban 40 kN (beban standar roda tunggal) terlihat bahwa lendutan pada Pelat Terpaku satu baris tiang (Gambar 2) lebih rendah dari lendutan pada tiang tunggal (Gambar 1).



Gambar 2. Hubungan  $P-\delta$  Pelat Terpaku satu baris tiang dengan variasi faktor aman global ( $SFG$ ) (Puri et al., 2021)

Lendutan Pelat Terpaku dianalisis dengan metode BoEF (*Beam on Elastic Foundation*) dengan menggunakan formula-formula Roarks (Roark, 2002) dan bantuan program “BoEF.xls” Program Versi 1.4, dengan meng-input nilai  $k'$ .

**Objek Penelitian**

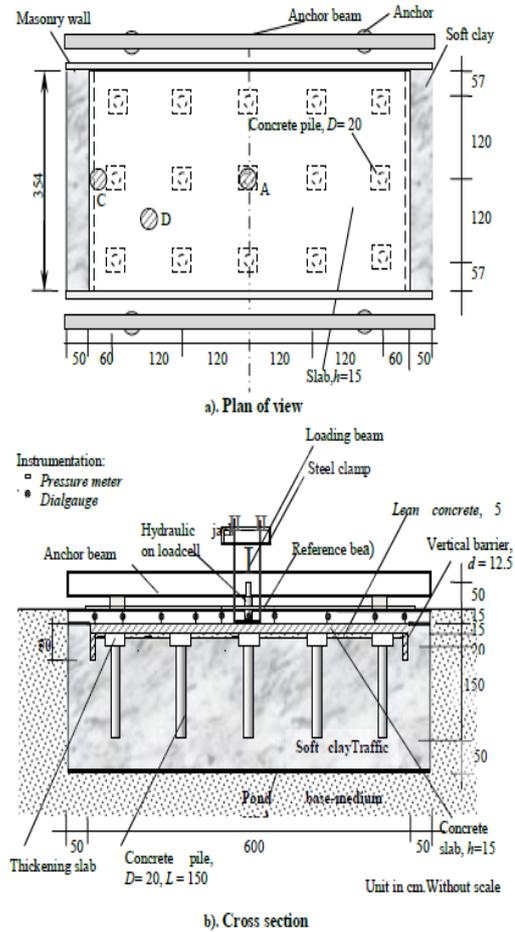
Penelitian dilakukan di Laboratorium Komputasi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Riau dengan menggunakan *BoEF.xls. Program* versi 1.4 pada lembar kerja *Ms. Excel*.

Sistem Perkerasan Pelat Terpaku tiga baris tiang dibangun di atas tanah lempung lunak, dengan sifat-sifat lempung tersaji dalam Tabel 1. Model skala penuh Pelat Terpaku tiga baris tiang ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 1. Sifat-sifat lempung Ngawi-2 (Puri et al., 2014)

| No. | Sifat-sifat                              | Satuan   | Rerata |
|-----|--|----------|--------|
| 1.  | Berat Spesifik, $G_s$<br>Batas-batas     | -        | 2,55   |
| 2.  | Konsistensi :                            |          |        |
|     | Batas Cair, $LL$                         | %        | 88,46  |
|     | Batas Plastis, $PL$                      | %        | 28,48  |
|     | Batas Susut, $SL$                        | %        | 9,34   |
|     | Indeks Plastis, $PI$                     | %        | 59,98  |
| 3.  | Kadar Air, $w$                           | %        | 54,87  |
| 4.  | Kadar Lempung                            | %        | 92,93  |
| 5.  | Kandungan Pasir                          | %        | 6,89   |
| 6.  | Berat Volume<br>Basah, $\gamma$          | $kN/m^3$ | 16,32  |
| 7.  | Berat Volume<br>Kering, $\gamma_d$       | $kN/m^3$ | 10,9   |
| 8.  | Kuat Geser<br><i>Undrained</i> , $S_u$ : |          |        |
|     | Tak Terganggu                            | $kN/m^2$ | 20,14  |

| No. | Sifat-sifat         | Satuan   | Rerata |
|-----|---------------------|----------|--------|
|     | <i>Remolded</i>     | $kN/m^2$ | 11,74  |
| 9.  | Uji Lapangan, $k_v$ | $kN/m^3$ | 15.000 |
| 10. | CBR Lapangan        | %        | 0,83   |
| 11. | Klasifikasi Tanah : |          |        |
|     | AASHTO              | -        | A-7-6  |
|     | USCS                | -        | CH     |

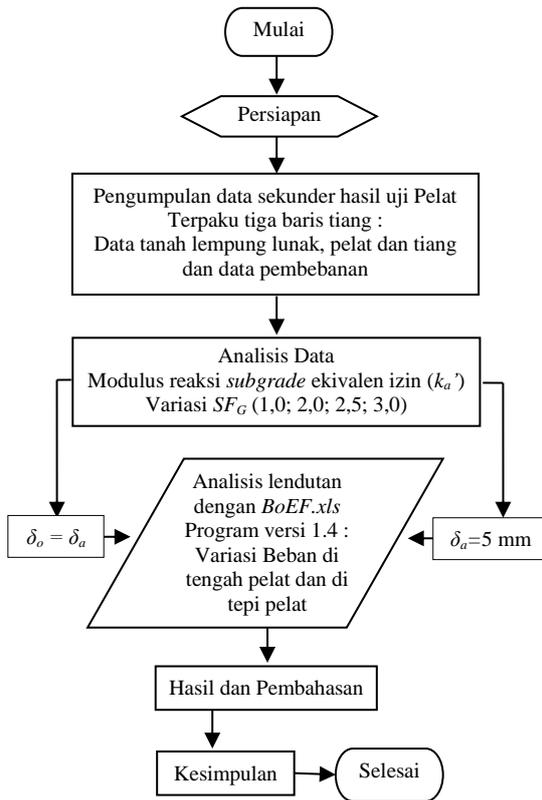


Gambar 3. Diagram skema Pelat Terpaku skala penuh (Puri et al., 2014)

Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa Sistem Perkerasan Pelat Terpaku tiga baris tiang terdiri atas pelat beton berukuran 6,00 m x 3,54 m, tebal pelat 0,15 m, dan tiang mikro (diameter 0,20 m, panjang 1,70 m, dan jarak 1,20 m).

Uji kuat tekan beton pelat diperoleh kuat tekan rerata pada umur 28 hari sebesar 29,21 MPa, target mutu beton K350 setara 29 MPa tercapai. Mutu beton tiang yang diperoleh 17,4 MPa setara K210. Sedangkan untuk lantai kerja diasumsikan mempunyai mutu K175 ( $f_c' = 14,5$  MPa) dengan campuran 1PC : 3PS : 5KR.

Agar penelitian terstruktur, maka penelitian dilakukan sesuai tahapan yang ada pada bagan alir yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan Alir Penelitian

### Metode Analisis

Analisis dilakukan semi-manual dimulai dengan pengumpulan data sekunder yaitu hasil uji skala penuh Sistem Pelat Terpaku tiga baris tiang (Puri et al., 2014). Kemudian dilanjutkan perhitungan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ) yang merupakan jumlah dari modulus reaksi *subgrade* tanah dasar ( $k$ ) dan tambahan modulus reaksi *subgrade* modifikasi ( $\Delta k_m$ ) seperti persamaan (8) dengan lendutan pengamatan sebagai lendutan izin ( $\delta_o = \delta_a$ ) dan lendutan izin maksimum ( $\delta_a = 5$  mm). Selanjutnya  $k'$  dibagi dengan faktor aman global ( $SF_G$ ) yang divariasikan yaitu 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 seperti persamaan (6). Perhitungan lendutan dilakukan dengan bantuan program “BoEF.xls” Program Versi 1.4. dengan meng-input nilai  $k'_a$  seperti persamaan (6) yang diperoleh dari hasil analisis sebelumnya, serta data-data dari Pelat Terpaku tiga baris tiang dan data pembebanan di tengah maupun di tepi pelat.

Tahapan perhitungan menggunakan metode BoEF disederhanakan sebagai berikut: (a) lantai kerja diabaikan, guna desain pada zona lebih aman, (b) hal yang sama pada pelat penebalan/pelat konektor juga diabaikan.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Berdasarkan lendutan pengamatan sebagai lendutan izin ( $\delta_o = \delta_a$ )

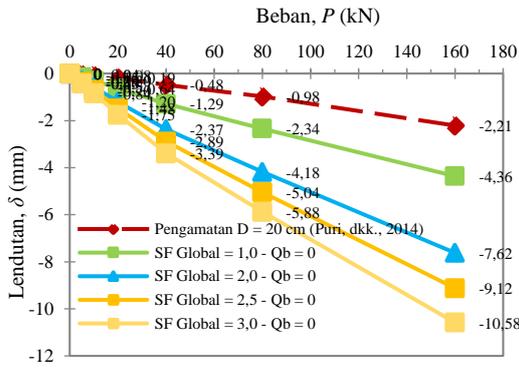
Lendutan pengamatan (Puri et al., 2014) merupakan lendutan yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini. Hasil analisis modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) dan tambahan modulus reaksi *subgrade* modifikasi ( $\Delta k_m$ ) berdasarkan  $\delta_o = \delta_a$  dianalisis dengan pembebanan di tengah pelat sesuai data uji Pelat Terpaku (Puri et al., 2014) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) tiang bulat  $D=20$  cm pembebanan di tengah pelat dengan  $\delta_o = \delta_a$

| P (kN) | $\delta_a$ (Puri, dkk., 2014) (mm) | $k'_a$ (kN/m <sup>3</sup> ) |          |          |         |
|--------|------------------------------------|-----------------------------|----------|----------|---------|
|        |                                    | 1,0                         | 2,00     | 2,50     | 3,00    |
| 5      | 0,04                               | 29202,20                    | 14601,10 | 11680,88 | 9734,07 |
| 10     | 0,08                               | 16543,59                    | 8271,80  | 6617,44  | 5514,53 |
| 20     | 0,19                               | 9214,91                     | 4607,46  | 3685,96  | 3071,64 |
| 40     | 0,48                               | 5994,74                     | 2997,37  | 2397,90  | 1998,25 |
| 80     | 0,98                               | 4918,33                     | 2459,17  | 1967,33  | 1639,44 |
| 160    | 2,21                               | 4343,20                     | 2171,60  | 1737,28  | 1447,73 |

Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat bahwa tambahan modulus reaksi *subgrade* modifikasi ( $\Delta k_m$ ) semakin menurun dengan bertambahnya beban yang diberikan. Sama halnya dengan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) yang semakin kecil dengan meningkatnya faktor aman  $SF_G$ .

Hasil lendutan pelat terpaku tiga baris tiang dengan pembebanan di tengah-tengah pelat akibat pengaruh variasi faktor aman global ( $SF_G$ ) pada modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) untuk tiang bulat diameter 20 cm dan panjang tiang  $L_p = 1,7$  m ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan  $P-\delta$  Sistem Pelat Terpaku tiang bulat diameter 20 cm pembebanan di tengah pelat dengan  $\delta_o=\delta_a$ .

Berdasarkan Gambar 5, dapat dilihat bahwa  $SF_G$  mempengaruhi lendutan pelat. Semakin besar faktor aman global, maka semakin tinggi lendutan yang terjadi. Lendutan cenderung *overestimated* dengan meningkatnya  $SF_G$ . Lendutan dengan  $SF_G = 1,0$  pada beban maksimum 160 kN adalah sebesar 4,36 mm mendekati lendutan pengamatan (Puri et al., 2014) sebesar 2,21 mm dengan *overestimated* diantara keduanya sebesar 97,29 %.

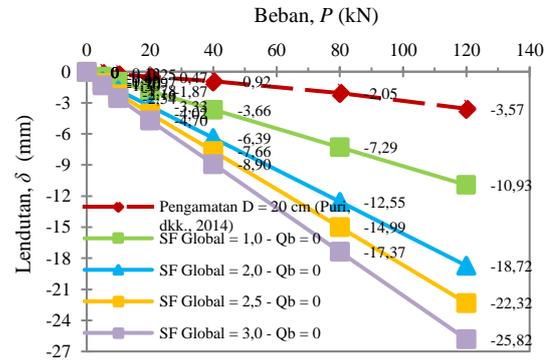
Hasil analisis modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) dan tambahan modulus reaksi *subgrade* modifikasi ( $\Delta k_m$ ) berdasarkan  $\delta_o=\delta_a$  dianalisis dengan pembebanan di tepi pelat sesuai data uji (Puri et al., 2014) seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) tiang bulat  $D=20$  cm pembebanan di tepi pelat dengan  $\delta_o=\delta_a$

| P (kN) | $\delta_a$ (Puri, dkk., 2014) (mm) | $k'_a$ (kN/m <sup>3</sup> ) |         |         |         |
|--------|------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|
|        |                                    | 1,0                         | 2,00    | 2,50    | 3,00    |
| 5      | 0,12                               | 12324,05                    | 6162,03 | 4929,62 | 4108,02 |
| 10     | 0,25                               | 7935,73                     | 3967,87 | 3174,29 | 2645,24 |
| 20     | 0,47                               | 6039,63                     | 3019,82 | 2415,85 | 2013,21 |
| 40     | 0,92                               | 4985,72                     | 2492,86 | 1994,29 | 1661,91 |
| 80     | 2,05                               | 4378,96                     | 2189,48 | 1751,58 | 1459,65 |
| 120    | 3,57                               | 4168,64                     | 2084,32 | 1667,46 | 1389,55 |

Berdasarkan Tabel 3 dapat diketahui bahwa modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) semakin kecil dengan meningkatnya faktor keamanan  $SF_G$  pada pembebanan di tepi pelat.

Hasil lendutan pelat terpaku tiga baris tiang dengan pembebanan di tepi pelat akibat pengaruh variasi faktor aman global ( $SF_G$ ) pada modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan  $P-\delta$  Sistem Pelat Terpaku tiang bulat diameter 20 cm pembebanan di tepi pelat dengan  $\delta_o=\delta_a$ .

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa  $SF_G$  mempengaruhi lendutan pelat. Semakin besar faktor aman global, maka semakin tinggi lendutan yang terjadi. Lendutan cenderung *overestimated* dengan meningkatnya  $SF_G$ . Lendutan dengan  $SF_G = 1,0$  pada beban maksimum 120 kN adalah sebesar 10,93 mm melebihi lendutan pengamatan (Puri, dkk., 2014) sebesar 3,57 mm dengan *overestimated* diantara keduanya sebesar 206,22%. Pembebanan di tepi pelat memberikan hasil lendutan yang sangat besar jika dibanding dengan lendutan pada pembebanan di tengah pelat. Ini karena lendutan pengamatan sebagai lendutan izin ( $\delta_o=\delta_a$ ) pada pembebanan di tepi pelat juga lebih besar dari lendutan pengamatan pada pembebanan di tengah-tengah pelat.

**Berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a=5$  mm)**

Akibat beban standar roda tunggal (40 kN), lendutan maksimum pelat terpaku hanya dengan satu baris tiang adalah lebih kecil dari 5,0 mm. Ini menunjukkan bahwa lendutan akan berkurang dengan semakin panjangnya perkerasan. Menurut Puri (2015a), agar pelat beton tetap terjaga dan tidak mengalami regangan tarik berlebihan, maka digunakan lendutan toleransi ( $\delta_a$ ) maksimum sebesar 5 mm atau 1/256 bentangnya.

Analisis reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) pelat terpaku dengan tiang bulat diameter 20 cm dengan panjang tiang ( $L_p$ ) = 1,7 m

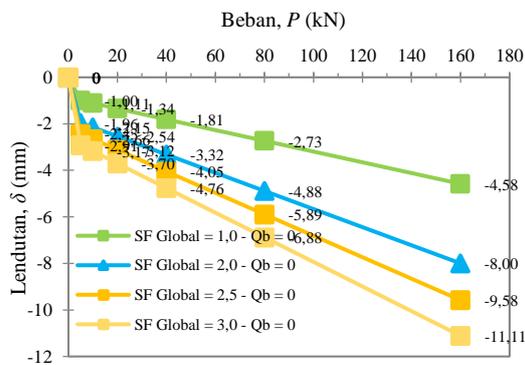
berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a=5$  mm) ditinjau pada pembebanan di tengah dan di tepi pelat ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) tiang bulat  $D=20$  cm pembebanan di tengah dan di tepi pelat dengan  $\delta_a=5$  mm

| $\delta_a$<br>(mm) | $k'_a$ (kN/m <sup>3</sup> ) |         |         |         |
|--------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|
|                    | 1,0                         | 2,00    | 2,50    | 3,00    |
| 5                  | 4087,51                     | 2043,76 | 1635,00 | 1362,50 |

Berdasarkan Tabel 4 dapat diketahui bahwa tambahan modulus reaksi *subgrade* modifikasi ( $\Delta k_m$ ) tidak dipengaruhi oleh pertambahan beban, karena besaran lendutan izin maksimum sama pada setiap beban. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) semakin kecil dengan meningkatnya faktor aman  $SF_G$ .

Hasil lendutan pelat terpaku tiga baris tiang dengan pembebanan di tengah-tengah pelat berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a= 5$  mm) dapat dilihat pada Gambar 7.

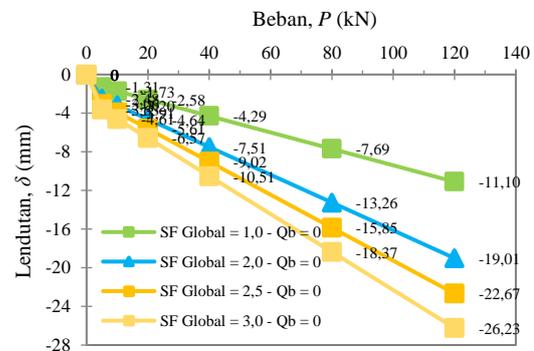


Gambar 7. Hubungan  $P$ - $\delta$  Sistem Pelat Terpaku tiang bulat diameter 20 cm pembebanan di tengah pelat dengan  $\delta_a=5$  mm.

Berdasarkan Gambar 7, dapat terlihat bahwa faktor aman global ( $SF_G$ ) mempengaruhi besaran lendutan. Semakin besar  $SF_G$  maka semakin tinggi lendutan yang terjadi. Lendutan dengan  $SF_G = 1,0$  pada beban maksimum 160 kN sebesar 4,579 mm, mendekati lendutan izin maksimum 5 mm (Puri, 2015a). Jika ditinjau berdasarkan beban standar roda tunggal 40 kN, lendutan dengan  $SF_G = 3$  masih dalam kategori aman, karena masih di bawah lendutan izin maksimum 5 mm. Penurunan kurva yang terlalu jauh pada beban 5 kN disebabkan oleh analisis

tambahan modulus reaksi *subgrade* modifikasi dibagi dengan toleransi penurunan pelat perkerasan kaku sebesar 5 mm (Puri, 2015). Oleh sebab itu, besaran  $k'_a$  untuk setiap  $SF_G$  mempengaruhi lendutan yang terjadi.

Hasil lendutan pelat terpaku tiga baris tiang dengan pembebanan di tengah-tengah pelat berdasarkan lendutan izin maksimum ( $\delta_a= 5$  mm) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan  $P$ - $\delta$  Sistem Pelat Terpaku tiang bulat diameter 20 cm pembebanan di tepi pelat dengan  $\delta_a=5$  mm.

Berdasarkan Gambar 8 dapat terlihat bahwa faktor aman global ( $SF_G$ ) mempengaruhi besar lendutan. Semakin besar  $SF_G$  maka semakin tinggi lendutan yang terjadi. Lendutan dengan  $SF_G = 1,0$  pada beban maksimum 120 kN sebesar 11,098 mm, melebihi lendutan izin 5 mm (Puri et al., 2015) sebagai lendutan maksimum dengan *overestimated* diantara keduanya sebesar 121,96%. Pembebanan di tepi pelat memberikan hasil lendutan yang sangat besar jika dibanding dengan lendutan pada pembebanan di tengah pelat.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Lendutan Pelat Terpaku tiga baris tiang dengan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) cenderung lebih besar dari lendutan pengamatan. Sehingga penggunaan  $SF_G = 1,0$  pada setiap pembebanan memiliki nilai lendutan yang paling mendekati lendutan pengamatan. Ini menunjukkan bahwa analisis Pelat Terpaku dengan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen izin ( $k'_a$ ) menghasilkan lendutan yang lebih besar

dibanding menggunakan modulus reaksi *subgrade* ekuivalen ( $k'$ ).

2. Analisis lendutan berdasarkan lendutan izin maksimum 5,0 mm cenderung menghasilkan nilai lendutan hitungan yang lebih besar daripada lendutan hitungan berdasarkan pengamatan sebagai lendutan izin. Lendutan hitungan juga cenderung lebih besar dibandingkan pengamatan bila digunakan faktor aman global yang semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa desain menggunakan pendekatan yang digunakan lebih aman, dimana hasil hitungan cenderung lebih besar bila dibandingkan dengan lendutan pengamatan.

Dari kesimpulan dapat diperoleh bahwa Sistem Pelat Terpaku tiga baris tiang dengan tiang bulat diameter 20 cm memberikan hasil lendutan yang sesuai dan  $SF_G = 1$  menghasilkan lendutan yang mendekati dengan lendutan pengamatan. Oleh sebab itu, tiang ini dapat digunakan dalam pengaplikasian di lapangan. Namun, untuk penelitian selanjutnya perlu ditinjau apabila diameter tiang divariasikan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini bagian dari penelitian didanai oleh Universitas Islam Riau melalui Skema Penelitian Internal Tahun Anggaran 2022 di bawah Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DPPM) dengan nomor kontrak 237/KONTRAK/P-PT/DPPM-UIR/07-2022.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Das, B. M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th Edition. In *Geotechnics for Developing Africa*.
- Hardiyatmo, H. C. (2011). Method to analyze the deflection of the nailed slab system. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 4(August).
- Hardiyatmo, H. C. (2016). Alternatif Solusi Pembangunan Perkerasan Jalan pada Subgrade Berdaya Dukung Rendah. *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik*.
- Oktavia, F., Puri, A. & Mildawati, R. (2018). Pengaruh Dimensi Tiang Mini Dan Faktor Aman Terhadap Lendutan Pelat Terpaku Tiang Tunggal. *JURNAL SAINTIS*, 18(2).  
[https://doi.org/10.25299/saintis.2018.vo118\(2\).3188](https://doi.org/10.25299/saintis.2018.vo118(2).3188)
- Puri, A, Oktavia, F., Dharmowijoyo, D. B. E. & Ali, M. (2021). Prediction of Deflection of Single-pile Nailed-slab by Using the Allowable Equivalent Modulus of Subgrade Reaction in Case of Additional Modulus from Modified Hardiyatmo Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 832(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/832/1/012022>
- Puri, Anas. (2019). UJI BEBAN HORIZONTAL PERKERASAN JALAN SISTEM PELAT TERPAKU TIANG TUNGGAL PADA LEMPUNG LUNAK. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 7(2).
- Puri, Anas, Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A. (2012a). Application of The Additional Modulus of Sub Grade Reaction to Predict The Deflection of Nailed-slab System Resting on Soft Clay Due to Repetitive Loadings. *Proc. Pertemuan Ilmiah Tahunan Ke-16 (PIT) HATTI, December*, 217–222.
- Puri, Anas, Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A. (2012b). Determining Additional Modulus of Subgrade Reaction Based on Tolerable Settlement for the Nailed-slab System Resting on Soft Clay. *IJCEE International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 12(03).
- Puri, Anas, Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A. (2013). Penerapan metode analisis lendutan pelat terpaku pada model skala penuh dan komparasi dengan uji pembebanan. *Proc. of Konferensi Nasional Teknik Sipil Ke-7 (KoNTekS7)*, 1(February 2016).
- Puri, Anas, Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A. (2015). Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Lempung Lunak. *Proc. Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNTSP) Ke-6, November*.
- Puri, Anas, Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A. (2019). Validating the curve of displacement factor due to full scale of one pile row nailed-slab pavement system. *International Journal of GEOMATE*, 17(59).  
<https://doi.org/10.21660/2019.59.65815>

- Puri, Anas, Rifa'i, A., Suhendro, B. & Hardiyatmo, H. C. (2014). Behavior Of Nailed-Slab System On Soft Clay Due To Repetitive Loadings By Conducting Full. *The 17 Th FSTPT International Symposium, Jember, 22-24 Agustus, 2014*, 739–750.
- Puri, Anas & Toyeb, M. (2020). Numerical analysis of nailed-slab pavement system by considering a void under the end of slab. *International Journal of GEOMATE*, 18(66).  
<https://doi.org/10.21660/2020.66.9306>
- Roark, R. J. (Raymond J. (2002). Roark's formulas for stress and strain Warren C. Young, Richard G. Budynas. In *Roark's formulas for stress and strain*.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C. & Rifa'i, A. (2020). Uji Beban Timbunan yang Diperkuat dengan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Gambut. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 25(2).  
<https://doi.org/10.14710/mkts.v25i2.21018>