



Studi Perilaku Lendutan Model Perkerasan Kaku *Nailed-slab System* dengan Tiang Terluar di Tepi Pelat pada Lempung Lunak Akibat Pembebanan Terpusat

Anas Puri^{1*}, Mohd. Syahminan¹, Fasckal Willman²

¹Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru,

²Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Pekanbaru

^{*}Email corresponding author: anaspuri@eng.uir.ac.id

Received: 30 Juli 2024 Revised: 20 Juli 2025 Accepted: 12 November 2025

Abstract

Nailed-slab System is a combination of pavement slabs and short piles connected by monoliths on the lower side of the plate. The piles are installed embedded in the soft soil. Previous studies tested models with configurations in which the outermost pile row is not placed exactly on the edge of the slab. This study aims to examine the slab's deflection behavior in the system by placing the outermost pile row exactly at the edge of the slab. Testing of the 1:5 scale model was carried out in the laboratory using soft clay soil as a medium. Variations of the model include the use of one and two rows of reinforced concrete piles. Loading is given in the form of a centralized load, either monotonically or repetitively, with variations in loading locations at the edges, between, and the center of the slab. The test results were then compared with previous studies. The results showed that the placement of the outermost pile at the edge of the slab was able to reduce deflection, which was 61.19% at the end of the slab and 53.19% at the center. This decrease in deflection is caused by the functioning of the pile as an anchor element that keeps the slab from tipping over and maintains contact between the slab and the subgrade. With these conditions, the vertical wall barrier at the end of the plate is no longer needed. In addition, the increase in the number of pile rows contributes to a decrease in deflection and an increase in the rigidity of the system. However, deflection behavior showed a worse tendency to repetitive loading than monotonic, with an increase in deflection of 60–72% due to repetitive load.

Keywords: *Soft clay; special rigid pavement; nailed-slab pavement; outer pile*

Abstrak

Perkerasan pelat terpaku merupakan kombinasi pelat perkerasan dan tiang-tiang pendek yang terhubung monolit pada sisi bawah pelat. Tiang-tiang tertanam dalam tanah dasar lunak. Studi sebelumnya menguji model dengan susunan tiang terluar tidak ditempatkan tepat pada tepi pelat. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perilaku lendutan pelat pada sistem tersebut dengan menempatkan baris tiang terluar persis di tepi pelat. Pengujian model skala 1:5 dilakukan di laboratorium menggunakan tanah lempung sebagai media. Variasi model meliputi penggunaan satu dan dua baris tiang dari beton bertulang. Pembebanan diberikan dalam bentuk beban terpusat, baik secara monotonik maupun repetitif, dengan variasi lokasi pembebanan di tepi, di antara, dan di tengah pelat. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Hasil penempatan tiang terluar di tepi pelat mampu menurunkan lendutan, yaitu sebesar 61,19% pada ujung pelat dan 53,19% pada bagian tengah. Penurunan lendutan ini disebabkan oleh berfungsinya tiang sebagai elemen angkur yang menahan pelat agar tidak terjungkit serta menjaga kontak antara pelat dan tanah dasar. Dengan kondisi tersebut, dinding pengaku di ujung pelat tidak lagi diperlukan. Selain itu, peningkatan jumlah baris tiang berkontribusi terhadap penurunan lendutan dan peningkatan kekakuan sistem. Namun demikian, perilaku lendutan menunjukkan kecenderungan yang lebih buruk pada pembebanan repetitif dibandingkan monotonik, dengan peningkatan lendutan sebesar 60–72% akibat beban repetitif.

Kata kunci: *Lempung lunak; jalan beton khusus; perkerasan pelat terpaku; tiang terluar*

Pendahuluan

Perkerasan jalan yang dibangun di atas tanah dasar lunak berpotensi besar mengalami penurunan tidak seragam. Kondisi tanah yang lunak, tidak homogenya tanah, dan distribusi beban yang tidak merata dapat menyebabkan penurunan tidak seragam, pada arah memanjang maupun arah melintang perkerasan. Wong dan Poulos (2001) melakukan analisis berbagai pendekatan pada sistem timbunan di atas tiang (*piled-embankment system*) yang dibangun di atas tanah lunak setebal 17 m dan ditumpukan hingga kedalaman 3 m pada lapisan tanah yang lebih kaku. Untuk mengatasi permasalahan deformasi bergelombang pada perkerasan lentur di atas timbunan bertiang dengan *individual pile cap*, telah diterapkan pelat beton bertulang menerus yang kemudian dilapisi perkerasan lentur (Sew & Chin, 2005).

Perkerasan jalan menerima pembebanan berulang dari roda kendaraan serta pengaruh temperatur yang menimbulkan momen lentur bolak-balik. Kondisi ini akan berpotensi menyebabkan deformasi bergelombang maupun kerusakan berupa retak atau patah pada struktur perkerasan. Permasalahan tersebut dapat diatasi melalui penerapan perkerasan kaku atau jalan beton khusus, seperti sistem cakar ayam dan sistem pelat terpaku (*nailed-slab system*) (Puri, 2025a). Aplikasi sistem cakar ayam sebagai perkerasan Jalan Tol Prof. Sedyatmo menuju Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Cengkareng, Banten, menunjukkan terjadinya penurunan yang cukup besar pada beberapa segmen. Penurunan ini disebabkan oleh konsolidasi tanah lunak di bawah timbunan. Namun demikian, sifat penurunannya relatif sama besar sehingga permukaan jalan tetap rata. Karena lendutan pelat perkerasan merata, perkerasan tidak mengalami kerusakan, sehingga tetap nyaman dilalui kendaraan. Kinerja yang baik dari sistem tersebut mendorong pengembangan konsep penggantian elemen “cakar” dengan tiang mikro pendek, yang kemudian dikenal sebagai sistem pelat terpaku (Hardiyatmo, 2008). Konsep ini didukung juga oleh penelitian terdahulu tentang penggunaan *pile cap* tipis pondasi pada tanah lunak (Hardiyatmo & Suhendro, 2003).

Model perkerasan sistem pelat terpaku terbukti mampu mengurangi lendutan serta menjaga kontak antara pelat dan tanah dasar (Puri *et al.*, 2011b; Puri *et al.*, 2012; Hardiyatmo, 2011; Diana, 2013; Puri, 2015, 2025b). Kajian perilaku model pelat terpaku dengan tiang individual telah dikerjakan oleh berbagai peneliti (Puri, *et al.*, 2018a; Puri, 2019a, 2019b; Oktavia, 2018). Adapun kajian perilaku model pelat terpaku dengan satu dan beberapa baris tiang akibat beban aksial tekan maupun beban cabut

telah dilakukan oleh berbagai peneliti (Hardiyatmo, 2011; Puri, 2015, 2016, 2017; Puri, *et al.*, 2011a, 2011b, 2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015a, 2015b, 2016, 2017, 2019, 2021, 2025; Oktavia, *et al.*, 2023; Somantri, 2013; Waruwu, *et al.*, 2019a, 2019b; Diana, *et al.*, 2017). Pada model yang telah dikembangkan oleh para peneliti tersebut, posisi tiang terluar tidak ditempatkan tepat di tepi pelat. Untuk mengurangi lendutan di ujung pelat, khususnya akibat beban yang bekerja di area tersebut, direkomendasikan penggunaan dinding penahan vertikal (*vertical wall barrier*) yang dalam praktik lapangan dikenal sebagai “dinding koperan” dan dibangun di ujung pelat (Suhendro & Hardiyatmo, 2010; Hardiyatmo, 2010; Puri *et al.*, 2011a, 2011b; Puri, 2015, 2025b). Penggunaan dinding koperan ini mampu mereduksi lendutan sekitar 20–38% (Puri *et al.*, 2011b, 2025b). Dalam penelitian diusulkan model sistem pelat terpaku dengan penempatan tiang terluar tepat di tepi pelat, sehingga tidak lagi memerlukan dinding koperan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lendutan perkerasan pada model sistem pelat terpaku dengan posisi tiang terluar berada tepat di tepi pelat. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan model sebelumnya yang menempatkan tiang terluar tidak berada di tepi pelat. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang apakah penempatan tiang pada tepi pelat dapat mengeliminasi kebutuhan dinding koperan. Temuan ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teori perilaku perkerasan sistem pelat terpaku.

Metode

Bahan dan alat

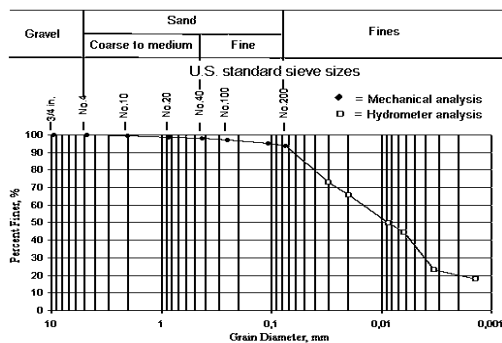
Penelitian ini menggunakan tanah lempung lunak sebagai media uji, yang diperoleh dari Ngawi, Jawa Timur. Karakteristik tanah tersebut disajikan pada Tabel 1 dan distribusi gradasinya ditampilkan pada Gambar 1. Sementara itu, pelat, lantai kerja, dan tiang model dibuat dari campuran pasir halus hingga kasar dengan semen Portland composite cement (PCC). Pelat model menggunakan tulangan wiremesh dengan diameter 3,0 mm dan ukuran bukaan 5,0 cm × 5,0 cm.

Tiang model menggunakan tulangan berupa kawat aluminium berdiameter 3,0 mm. Ukuran pelat model untuk satu baris tiang adalah 104 cm × 20 cm × 3 cm. Satu baris tiang terdiri atas 6 buah tiang model. Ukuran pelat model untuk dua baris tiang adalah 104 cm × 40 cm × 3 cm. Satu baris tiang juga terdiri atas 6 buah tiang model. Semua pelat model diberi lantai kerja setebal 1,0 cm di bawahnya.

Tiang model mempunyai ukuran panjang $L_p = 40$ cm dan diameter, $d = 4,0$ cm. Semua tiang model dipasang vertikal dengan jarak as ke as tiang (s) sebesar 20 cm (rasio $s/d = 5,0$). Pelat model dan tiang model dihubungkan secara monolit. Gambar 2 dan 3 menyajikan skema uji model dan foto pelaksanaan secara berurutan. Uji model pelat terpaku dengan 2 baris tiang dilakukan guna mengamati pengaruh jumlah baris tiang terhadap perilaku lendutan pelat.

Tabel 1. Properties lempung lunak
(Puri et al. 2011a)

Parameter	Satuan	Besaran	Rerata
Berat spesifik, G_s	-	2,3	
Batas-batas konsistensi:			
- Batas cair, LL	%	68,39	
- Batas plastis, PL	%	29,55	
- Batas susut, SL	%	7,68	
- Indeks plastisitas, PI	%	38,84	
- Indeks cair, LI	%	0,33	
Kadar air asli, w_n	%	42,34	
Kadar air, w	%	38,32-46,48	42,4
Kadar lempung	%	93,85	
Kandungan pasir	%	6,15	
Berat volume basah, γ	kN/m^3	16,7-17,2	17,0
Berat volume kering, γ_d	kN/m^3	11,7-12,1	11,9
Kuat geser <i>undrained</i> , S_u	kN/m^2	14-28	21,0
CBR	%	1,69-1,94	1,8
Klasifikasi tanah:			
- AASHTO	-	A-7-5	
- USCS	-	CH	



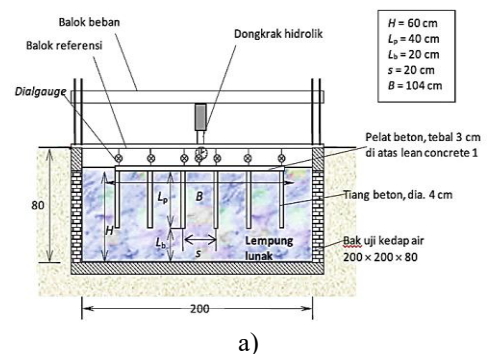
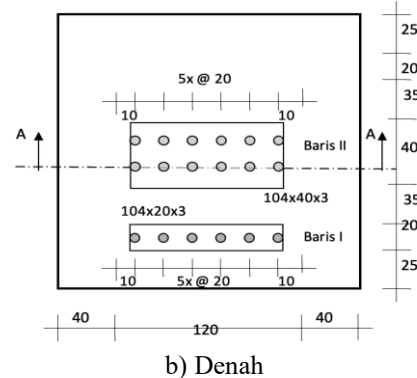
Gambar 1. Sebaran gradasi tanah lempung lunak (Puri et al., 2011a)

Dalam penelitian ini digunakan peralatan untuk pengujian sifat indeks tanah meliputi alat uji ayakan dan hidrometer, berat jenis, konsistensi, serta pengujian sifat mekanik tanah berupa uji CBR dan uji tekan bebas. Sementara itu, peralatan untuk uji beban terdiri atas *loading frame*, dongkrak hidrolik, *dial gauge*, serta perlengkapan lainnya.

Cara penelitian

Media pengujian model adalah tanah lempung lunak dengan kadar air mendekati kondisi lapangan,

yaitu sekitar 42%. Selanjutnya, tanah dihamparkan secara berlapis di dalam kolam uji dengan ketebalan tiap lapisan sekitar 15,0 cm sebanyak enam lapisan. Setiap lapisan dipadatkan secara manual menggunakan tamper. Setiap lapisan dikontrol nilai kuat tekan bebasnya setelah pemadatan, dengan kuat tekan bebas 50–100 kN/m^2 menggunakan alat sederhana MaTest. Setelah media tanah selesai dipersiapkan, dilakukan pengujian CBR serta pengambilan contoh tanah tak terganggu menggunakan *core cutter*. Sampel tanah tersebut diuji kadar air dan kuat tekan bebasnya. Selanjutnya, dilakukan pengukuran posisi pelat model dan tiang model. Kemudian dilanjutkan dengan pemancangan tiang model menggunakan dongkrak hidrolik.



Gambar 2. Skema model uji perkerasan sistem pelat terpaku



Gambar 3. Foto uji model pelat terpaku dengan 2 baris tiang untuk beban di ujung pelat

Setelah seluruh tiang model dipancang, dilanjutkan dengan pengecoran lantai kerja di antara tiang model. Digunakan lantai kerja setebal 1,0 cm.

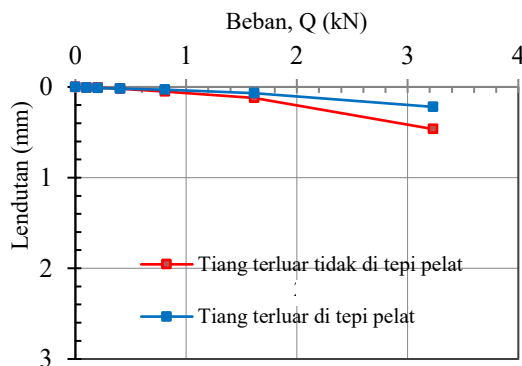
Tahap berikutnya adalah pemasangan tulangan dan pengecoran pelat, dengan permukaan pelat diratakan sejajar dengan permukaan tanah. Setelah mencapai umur 28 hari, kemudian pengujian pembebanan dilakukan. Selama proses penelitian, kondisi tanah dijaga dengan menutupnya menggunakan lembaran plastik dan kain basah serta dilakukan penyiraman dua kali sehari.

Uji beban yang dilakukan berupa beban terpusat sentris, eksentris di antara tengah dan ujung (beban antara), dan di ujung pelat. Semua model uji tidak sampai runtuh, di mana kurva beban vs. penurunan hanya sampai zona awal plastis. Terdapat dua macam beban, yaitu beban monotonik dan beban repetitif. Beban bekerja pada pelat model melalui pelat beban. Luasan bidang kontak roda kendaraan pada pelat perkerasan dimodelkan dengan pelat beban berdiameter 6,0 cm dengan tebal 1,0 cm.

Hasil dan Pembahasan

Hubungan beban dan lendutan

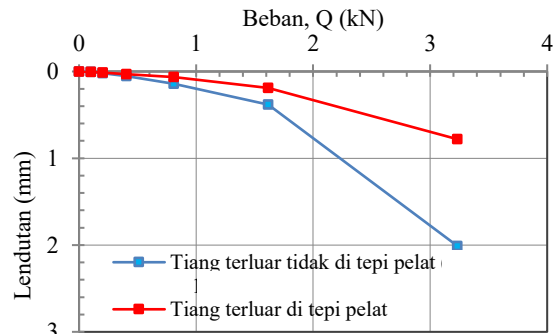
Hasil pengujian yang digambarkan dalam bentuk kurva hubungan beban vs lendutan diberikan pada Gambar 4 dan 5, masing-masing untuk beban sentris (tengah) dan beban di pinggir. Hasil uji dikomparasikan dengan hasil pengamatan oleh Puri *et al.* (2012). Data pembandingan adalah untuk model pelat terpaku di mana tiang terluar tidak berada tepat di tepi pelat. Tampak bahwa pelat terpaku dengan tiang terluar berada di tepi pelat lebih kaku dari pada pelat terpaku dengan tiang terluar tidak berada di tepi pelat, untuk kedua kondisi pembebanan (beban sentris dan beban di pinggir pelat).



Gambar 4. Kurva beban vs lendutan Model 1 baris tiang untuk beban sentris

Lendutan pelat tereduksi secara signifikan untuk penempatan tiang terluar di tepi pelat. Lendutan di tengah pelat akibat beban sentris mengalami reduksi sebesar 53,19% (Gambar 4), akibat beban sentris $Q = 3,2\text{kN}$. Lendutan ujung pelat akibat beban di pinggir pelat mengalami reduksi yang lebih

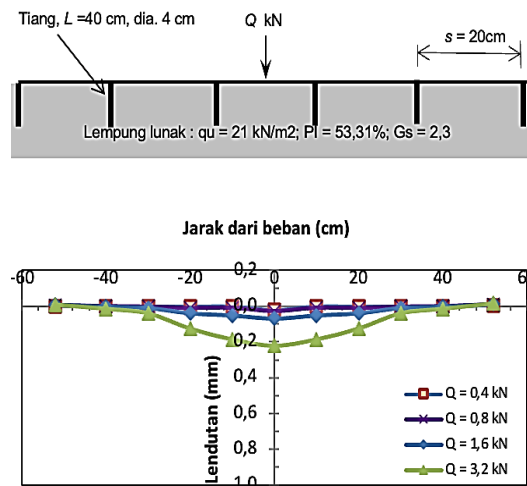
signifikan, sebesar 61,19%. Penempatan tiang terluar di tepi pelat cenderung meningkatkan kekakuan sistem dibandingkan dengan sistem pelat terpaku dengan tiang terluar yang ditempatkan tidak berada di tepi pelat.



Gambar 5. Kurva beban vs lendutan Model 1 baris tiang untuk beban di ujung pinggir

Perilaku lendutan pelat terpaku - beban sentris

Gambar 6 menyajikan pola lendutan sepanjang pelat model sistem pelat terpaku satu baris tiang dengan tiang terluar di tepi pelat. Beban yang dikerjakan adalah beban sentris (di tengah pelat). Lendutan maksimum tepat di titik beban dan semakin berkurang ke ujung-ujung pelat (Puri, *et al.*, 2011a, 2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015b).

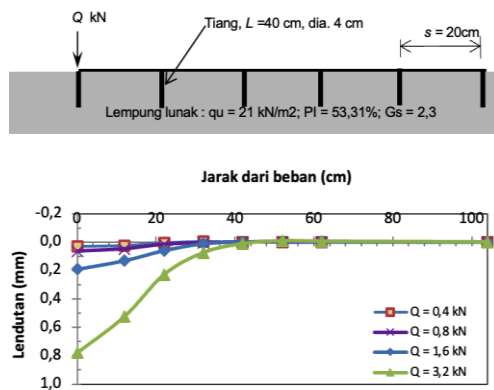


Gambar 6. Lendutan memanjang pelat terpaku Model 1 baris tiang dengan tiang terluar di tepi pelat akibat beban terpusat sentris

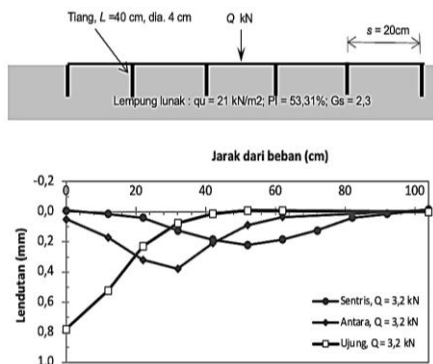
Ujung-ujung pelat tidak mengalami jungkitan (lendutan negatif), membuktikan bahwa tiang-tiang berfungsi sebagai angkur yang menjaga pelat tetap kontak dengan tanah (Puri, *et al.*, 2011a, 2012a). Lendutan pelat yang berupa penurunan terjadi di sekitar titik beban dengan cakupan lebar lendutan sebesar sepertiga sampai setengah panjang pelat. Lebar cakupan lendutan meningkat seiring dengan peningkatan beban.

Perilaku lendutan pelat terpakui beban di ujung

Distribusi lendutan sepanjang model pelat terpakui dengan satu baris tiang akibat beban di tepi pelat diberikan pada Gambar 7. Lendutan maksimum pelat terjadi hanya di ujung pelat di mana beban bekerja. Selanjutnya, lendutan berkurang ke arah tengah pelat hingga sepertiga panjang pelat. Bagian ujung lain tidak mengalami jungkitan karena ditahan oleh tiang-tiang yang berfungsi sebagai angkur/jangkar. Fungsi angkur tersebut sebagai kontribusi tahanan gesek tiang-tiang. Lendutan pelat yang terjadi terdistribusi dari tiang pertama hingga tiang ketiga dari titik beban akibat beban kerja maksimum.



Gambar 7. Lendutan memanjang pelat terpakui Model 1 baris tiang dengan tiang terluar di tepi pelat akibat beban terpusat tepi pelat



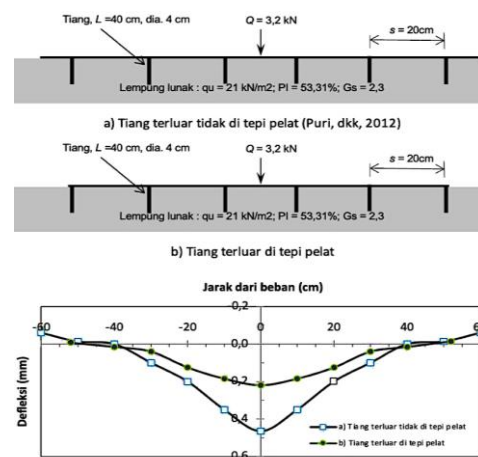
Gambar 8. Lendutan pelat terpakui Model 1 baris tiang dengan tiang terluar di tepi pelat akibat terpusat $Q = 3,2$ kN pada berbagai posisi beban

Pola distribusi lendutan sepanjang pelat untuk berbagai variasi posisi beban diberikan pada Gambar 8. Model adalah pelat terpakui satu baris tiang dengan tiang terluar berada di tepi pelat. Posisi titik kerja beban terdiri atas beban sentris, beban antara, dan beban di ujung pelat. Lendutan maksimum semakin meningkat dengan posisi beban semakin ke ujung pelat (Puri, 2015). Posisi beban di ujung pelat menghasilkan lendutan terbesar. Kondisi kritis terjadi akibat pembebanan di ujung pelat (Puri *et al.* 2012; Puri, 2015). Dengan

demikian, sistem pelat terpakui mesti dirancang supaya bagian ujung-ujung pelat mampu memikul beban kerja pada ujung pelat.

Pengaruh tiang terluar di tepi pelat terhadap perilaku lendutan pelat terpakui

Perbandingan distribusi lendutan pelat terpakui pada arah panjang pelat antara tiang terluar di tepi pelat dan tiang terluar tidak di tepi pelat diberikan pada Gambar 9 untuk beban sentris dan Gambar 10 untuk beban di ujung/ tepi pelat. Kedua hasil tersebut diambil untuk beban yang sama sebesar 3,2 kN. Model pelat terpakui adalah satu baris tiang. Bahasan untuk masing-masing posisi beban diberikan berikut ini.

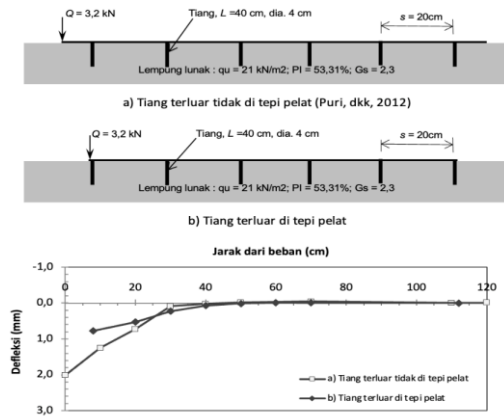


Gambar 9. Pengaruh letak tiang terluar terhadap perilaku lendutan pelat terpakui - 1 baris tiang - beban terpusat sentris $Q = 3,2$ kN

Model dengan beban sentris memperlihatkan pengaruh penempatan tiang terluar di tepi pelat menghasilkan lendutan maksimum lebih kecil dibandingkan dengan model di mana tiang terluar tidak di tepi pelat. Model dengan tiang terluar di tepi pelat mengurangi lendutan hingga 53,19% untuk beban sentris. Selain itu, seluruh pelat tetap kontak dengan tanah (tidak ada pelat yang terjungkit). Model dengan tiang terluar tidak di tepi pelat, masih menunjukkan perilaku ujung-ujung pelat mengalami jungkitan walaupun tidak signifikan akibat beban sentris. Model dengan tiang terluar di tepi pelat mengurangi lendutan di ujung-ujung pelat secara sangat signifikan, yaitu hingga 83,33%.

Model dengan beban di tepi (Gambar 10) memperlihatkan bahwa penempatan tiang terluar di tepi pelat menghasilkan lendutan maksimum lebih kecil dibandingkan dengan model di mana tiang terluar tidak di tepi pelat. Model dengan tiang terluar di tepi pelat mereduksi lendutan mencapai 61,19%. Seluruh pelat tetap kontak dengan tanah (terbukti dengan tidak adanya pelat yang terjungkit). Lendutan cenderung tidak terjadi mulai

dari tiang ketiga dari sisi kiri hingga ujung pelat sisi kanan. Artinya, pada bagian ini, tiang-tiang memberikan perlawanan terhadap gaya angkat, sehingga pelat tidak terjungkit. Fungsi angkur dari tiang bekerja dengan baik.



Gambar 10. Pengaruh letak tiang terluar terhadap perilaku lendutan pelat terpaku model 1 baris tiang akibat beban terpusat $Q = 3,2$ kN di ujung

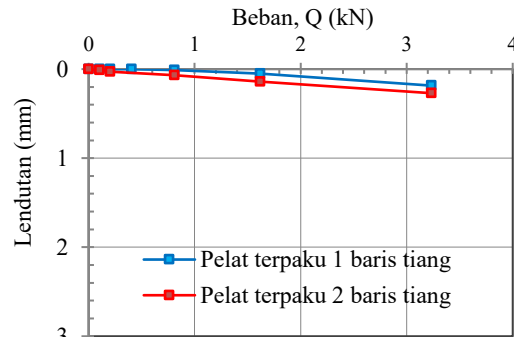
Perilaku kedua model dengan beban sentris dan beban di tepi pelat mempunyai kesamaan, yaitu model dengan tiang terluar di tepi pelat mempunyai kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan model di mana tiang terluar tidak di tepi pelat. Dengan demikian, posisi tiang terluar berpengaruh pada kekakuan dan perilaku lendutan model.

Untuk mengurangi lendutan di ujung pelat akibat beban yang bekerja di tepi pelat dapat dikurangi dengan cara penggunaan mutu beton dan jumlah tulangan yang memadai, menggunakan pelat yang lebih tebal, atau menggunakan dinding penahan vertikal (dinding koperan) di bagian ujung pelat tersebut (Puri *et al.* 2011 & 2012). Selain berfungsi sebagai pengaku ujung pelat, dinding koperan juga berfungsi sebagai penghalang pengaruh kelembapan terhadap tanah dasar di bawah pelat. Penelitian ini memberikan alternatif lain guna mengatasi lendutan ujung pelat akibat beban di tepi, yaitu dengan menempatkan tiang terluar tepat di tepi pelat. Dengan cara ini, dinding koperan atau metode lainnya tidak diperlukan lagi.

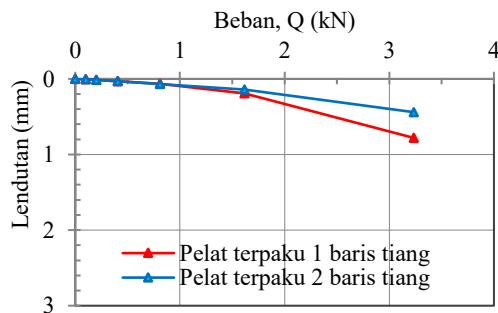
Pengaruh jumlah baris tiang

Telah dilakukan uji model dengan 2 (dua) baris tiang untuk mengetahui pengaruh jumlah baris tiang terhadap perilaku lendutan sistem pelat terpaku dengan tiang terluar berada di tepi pelat. Hasil pengujian untuk hubungan beban dan penurunan diberikan pada Gambar 11 dan 12. Hasil lendutan untuk beban sentris mengalami anomali. Hasil uji menunjukkan bahwa model dengan 2 baris tiang

cenderung mengalami lendutan sedikit lebih besar dibandingkan dengan model satu baris tiang. Anomali hasil ini diduga karena tidak homogenya tanah pada model dua baris tiang dibandingkan dengan tanah pada model satu baris tiang. Pengaruh jumlah baris tiang untuk tiang terluar yang tidak berada di tepi pelat telah diberikan oleh Puri, *et al.* (2011a).



Gambar 11. Pengaruh jumlah baris tiang terhadap hubungan beban dan lendutan untuk beban sentris



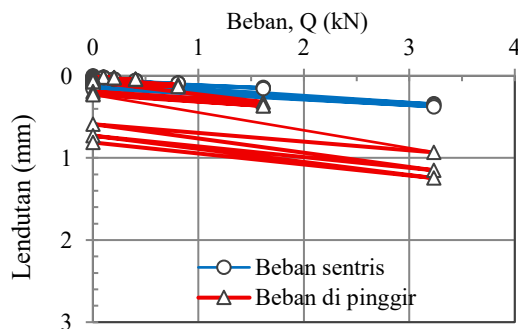
Gambar 12. Pengaruh jumlah baris tiang terhadap hubungan beban dan lendutan untuk beban di ujung

Jumlah baris tiang yang bertambah dapat mengurangi lendutan pelat perkerasan akibat semua posisi beban (Puri *et al.* 2011a). Lendutan di ujung pelat cenderung lebih kecil dengan bertambahnya jumlah baris tiang. Peningkatan jumlah baris tiang cenderung mengurangi lendutan pelat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kekakuan sistem pelat terpaku. Dalam praktiknya, jumlah baris akan semakin banyak dengan semakin panjangnya perkerasan jalan. Mengacu pada perkerasan sistem cakar ayam yang menggunakan perkerasan bertulangan menerus, pelat perkerasan semakin panjang, maka perkerasan sistem pelat terpaku juga menggunakan perkerasan bertulangan menerus. Dengan demikian, jumlah baris tiang akan semakin banyak, sehingga reduksi lendutan semakin besar.

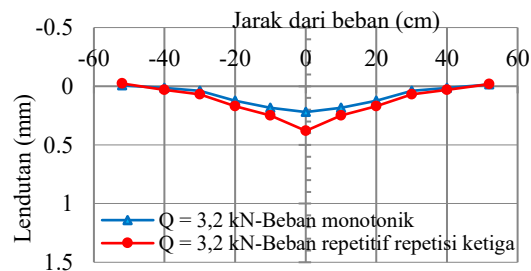
Pengaruh beban repetitif

Beban kendaraan yang melintasi perkerasan merupakan beban berulang/repetitif. Karena

disertai dengan kecepatan, beban kendaraan menimbulkan getaran yang kemudian dikenal dengan sebutan beban vibrasi. Uji beban repetitif dilakukan untuk mensimulasikan beban repetitif roda kendaraan. Setiap penambahan dan pengurangan beban dilakukan setelah kecepatan lendutan mencapai 0,03 mm/menit. Gambar 13 memperlihatkan hubungan beban terhadap lendutan pelat di titik beban akibat beban repetitif di tengah dan di pinggir pelat. Setiap beban dilakukan sebanyak 3 (tiga) kali pengulangan. Terlihat bahwa lendutan akibat beban di tengah/sentris cenderung lebih kecil dibandingkan dengan beban di ujung pelat. Lendutan semakin besar seiring bertambahnya repetisi beban. Artinya, beban repetitif di tepi pelat cenderung memberikan potensi dampak negatif lebih besar bagi perkerasan.



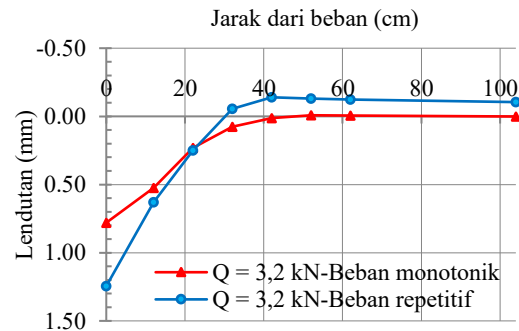
Gambar 13. Kurva beban vs lendutan pelat model 1 baris tiang di titik beban akibat beban repetitif di tengah dan di pinggir pelat



Gambar 14. Distribusi lendutan sepanjang pelat model 1 baris tiang akibat beban monotonik dan repetitif di tengah pelat

Gambar 14 memperlihatkan distribusi lendutan sepanjang pelat akibat jenis beban di tengah pelat. Lendutan akibat beban repetitif cenderung lebih besar dibandingkan dengan akibat beban monotonik. Namun, tidak terdapat ujung pelat yang terjungkit akibat beban monotonik maupun repetitif. Perilaku yang serupa juga terjadi untuk beban di pinggir pelat (Gambar 15). Lendutan pelat akibat beban repetitif cenderung lebih besar dibandingkan dengan akibat beban monotonik. Akan tetapi, akibat beban repetitif, bagian sisi lain pelat cenderung mengalami jungkitan/lendutan negatif. Hal ini tidak terjadi akibat beban

monotonik. Secara umum, pengaruh yang lebih buruk pada perilaku lendutan pelat terjadi akibat beban repetitif (Puri, *et al.*, 2016).



Gambar 15. Distribusi lendutan sepanjang pelat model 1 baris tiang akibat beban monotonik dan repetitif di pinggir pelat

Kesimpulan

Uji model Sistem Pelat Terpaku dengan penempatan tiang terluar tepat di tepi pelat telah dilakukan dan dibahas. Beberapa kesimpulan dapat ditarik sebagai berikut

Penempatan tiang terluar di tepi pelat memberikan kontribusi positif pada perilaku lendutan pelat model. Reduksi lendutan mencapai 53,19% untuk beban sentris dan mencapai 61,19% untuk beban di ujung. Kondisi kritis lendutan pelat sistem pelat terpaku terjadi akibat beban di ujung pelat, namun tidak terjadi jungkitan di ujung lainnya. Hal ini mengonfirmasi bahwa pelat tertahan dari jungkitan sebagai akibat dari tiang-tiang yang mengarahkan fungsi angkurnya. Keawetan sistem diharapkan terjaga dengan kinerja yang baik, di mana lendutan pelat terjadi, namun pelat tetap kontak dengan tanah dasar. Penggunaan dinding koperan guna mereduksi lendutan di ujung pelat dapat dihindari dengan menempatkan tiang terluar di tepi pelat. Pengaruh lebih buruk pada lendutan pelat diakibatkan oleh beban repetitif dibanding dengan beban monotonik.

Penelitian ini memberikan implikasi bahwa menempatkan tiang terluar di pinggir pelat menjadi solusi alternatif guna mereduksi lendutan berlebihan di ujung terluar pelat. Dengan demikian, diharapkan masa layan perkerasan lebih panjang dan berkelanjutan. Penelitian ini perlu dilanjutkan terkait sistem penulangan sambungan antara tiang dan pelat pada bagian tepi pelat di mana posisi tiang terluar berada.

Ucapan Terima Kasih

Pendanaan penelitian ini melalui Skema Penelitian Internal Tahun Anggaran 2023 di bawah Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DPPM)

Universitas Islam Riau, dengan nomor kontrak 664/KONTRAK/P-PT/DPPM-UIR/06-2023.

Daftar Pustaka

- Diana, W., (2013). Perilaku Model Sistem Pelat Terpaku (Nailed Slab) terhadap Pengembangan pada Tanah Dasar Ekspansif, *Seminar Nasional III Teknik Sipil 2013*, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, pp. G352-G360.
- Diana, W., Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B. (2017). Effect of pile connections on the performance of the nailed slab system on the expansive soil. *GEOMATE Journal*, 12(32), 134-141.
<https://doi.org/10.21660/2017.32.42773>
- Hardiyatmo, H. C. (2008). Sistem” Pelat Terpaku”(Nailed Slab) Untuk Perkuatan Pelat Beton Pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna dalam Penanganan Sarana-prasarana*, MPSP JTSL FT UGM., pp. M-1—M-7.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Perancangan sistem cakar ayam modifikasi untuk perkerasan jalan raya*. Gadjah Mada University Press., Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H.C., (2011). Method to Analyze the Deflection of the Nailed Slab System, *IJCEE-IJENS*, 11(4), 22-28.
- Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B. (2003). Fondasi Tiang dengan Pile Cap Tipis sebagai Alternatif untuk Mengatasi Problem Penurunan Bangunan di Atas Tanah Lunak. *Laporan Komprehensif Penelitian Hibah Bersaing IX Perguruan Tinggi, Tahun Anggaran, 2003*. Lembaga Penelitian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Oktavia, F., Puri, A., & Mildawati, R. (2018). Pengaruh Dimensi Tiang Mini Dan Faktor Aman Terhadap Lendutan Pelat Terpaku Tiang Tunggal: The Effect of Mini Pile Dimensions And Safe Factors on The Deflection of Single-Pile Nailed Slab. *Jurnal Saintis*, 18(2), 11-22.
- Oktavia, F., & Puri, A. (2023). Pengaruh Faktor Aman Global Modulus Reaksi Subgrade Ekuivalen Izin Terhadap Lendutan Sistem Pelat Terpaku Tiga Baris Tiang. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 21(2), 39-48.
<https://doi.org/10.22219/jmts.v21i1.25869>
- Puri, A., (2025a). *Jalan Beton Khusus Sistem Cakar Ayam dan Sistem Pelat Terpaku*, UIR Press, Pekanbaru.
- Puri, A., (2025b). *Perilaku Jalan Beton Sistem Pelat Terpaku pada Lempung Lunak Berdasarkan Eksperimen Skala Kecil*, UIR Press, Pekanbaru.
- Puri, A., (2015a). Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lunak, *1st Annual Civil Engineering Seminar (ACES)*. Pp. 305-313.
- Puri, A., (2015b). *Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Lempung Lunak*”, Ph.D. dissertation, Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Puri, A., (2017). Developing curve of displacement factor for determination of additional modulus of subgrade reaction on nailed-slab pavement system. *International Journal of Technology*, 8(01), 124-133.
<https://doi.org/10.21660/2019.59.65815>
- Puri, A., (2016). Behavior of Uplift Resistance of Single Pile Row Nailed-slab Pavement System on Soft Clay Subgrade, *The 3rd Asia Future Conference (AFC)*, pp. 1226-1230.
- Puri, A. (2019a). Analisis Numerik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Tiang Tunggal menggunakan Tiang Pipa Baja pada Tanah Lunak. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(2), 171-179.
<https://doi.org/10.14710/mkts.v25i2.1909>
- Puri, A. (2019b), Uji Beban Horizontal Perkerasan Jalan Sistem Pelat Terpaku Tiang Tunggal Pada Lempung Lunak, *Jurnal Spektran*, 7(2), 155-161.
- Puri, A., Oktavia, F., Mildawati, R., (2018a). Pengaruh Tahanan Ujung Tiang dan Faktor Aman Terhadap Lendutan Pelat Terpaku Tiang Tunggal Pada Lempung Lunak, *Proc. 20th SEAGC-3rd AGSSEA Conference in conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 529-533.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., & Rifa’i, A. (2011a). Studi Eksperimental Lendutan Pelat yang Diperkuat Tiang-tiang Friksi Pendek pada Lempung Lunak., *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) XI*, Yogyakarta, 10-11 Februari 2011, pp. 317-321.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., & Rifa’i, A. (2011b). Kontribusi Koperan dalam Mereduksi Lendutan Sistem Pelat Terpaku pada Lempung Lunak. In *Proc. of 9th Indonesian Geotech. Conf. and 15th Annual Scientific Meeting (KOGEI IX & PIT XV) HATTI* (pp. 299-306).
- 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. *International Journal of Civil and Environmental Engineering (IJCEE)-IJENS*, 12(03). 32-40.

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. In *Proc. of 16th Annual Scientific Meeting (PIT) HATTI* (pp. 217-222).

Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., (2013). Behavior of Fullscale nailed-slab System with Variation on Load Positions, *1st Int. Conf. on Development Infrastructure (ICID)*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, 1-3 November 2013, pp. 26-36.

Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., (2014). Behavior of Nailed-slab System on Soft Clay Due to Repetitive Loadings by Conducting Full Scale Test" *Proc. 17th Int. Symp. FSTPT*, University of Jember, 2014, pp. 739-750.

Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., Khatib, A., (2015). Validasi Metode Analisis Lendutan Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Model Skala Penuh Dengan Satu Baris Tiang, *Proc. PIT XIX dan KOGEI X*, HATTI, 2015, pp. 453-464.

Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., (2015b). Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Dasar Lempung Lunak, *Prosiding Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KN PTS)*, pp. 7-17.

Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., (2016). Differential Deflection of Rigid Pavement of 1-Pile Row Nailed-Slab System on Soft Clay Subgrade Due to Monotonic and Repetitive Loadings, *Proc. The 1st International Conference On Technology, Innovation, and Society (ICTIS)*, pp. 377-388.

Puri, A., Suhendro, B., & Rifa'i, A. (2017). Effects of Vertical Wall Barrier on The Rigid Pavement Deflection of Full Scale 1-Pile Row Nailed-Slab System on Soft Sub Grade. *International Journal of GEOMATE*, 12(32), 25-29.
<https://doi.org/10.22219/jmts.v21i1.25869>

Puri, A., 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. *GEOMATE Journal*, 17(59), 181-188.
<https://doi.org/10.21660/2019.59.65815>

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. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 832, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/832/1/012022/meta#references>

Puri, A., Oktavia, F., Dharmowijoyo, D. B., Ali, M., & Tanjung, L. E. (2025). Prediction the Maximum Deflection of the Prototype of Nailed-slab Pavement System Using the Allowable Equivalent Modulus of Subgrade Reaction. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 10(1), 9-14.
<https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.1.12061>

Sew, I. D. G. S., & Chin, I. T. Y. (2005). Innovative Substructures on Soft Ground. *Master Builders Journal*, 2nd Quarter, 8-14.

Somantri, A. K. (2013). Kajian Lendutan Pelat Terpaku pada Tanah Pasir dengan Menggunakan Metode Beam on Elastic Foundation (BoEF) dan Metode Elemen Hingga. *Master's Thesis, Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana UGM, Yogyakarta*.

Suhendro, B., & Hardiyatmo, H. C. (2010). Sistem Perkerasan Cakar Ayam Modifikasi (CAM) sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di Atas Tanah Lunak, Ekspansif, dan Timbunan. In *Prosiding Seminar dan Pameran Sehari 2010 Inovasi Baru Teknologi Jalan dan Jembatan*.

Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. H. (2019a). The Performance of the nailed slab system-supported embankment on peat soil. *International Review of Civil Engineering*, 10(5), 243-248.
<https://doi.org/10.15866/irece.v10i5.15757>

Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2019b). Uji Beban Timbunan yang Diperkuat dengan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Gambut. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(2), 152-159.
<https://doi.org/10.14710/mkts.v25i2.21018>

Wong, S. C., & Poulos, H. G. (2001). Performance of various piled embankment systems. In *Proc. of the 5th Int. Conf. on Deep Foundation Practice incorporating Piletalk, Singapour*, 4-6 april 2001. *Singapour: CI Premier* (pp. 395-401).