

Analisis Lendutan Sistem Pelat dengan Perkuatan Tiang pada Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan SAP 2000

Deflection Analysis of Plate with Pile Reinforcement System on Expansive Clay Using SAP 2000

Asih Arum Lestari, Willis Diana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Struktur perkerasan jalan yang dibangun di atas tanah dasar ekspansif dapat menimbulkan masalah apabila tidak diberikan perkuatan khusus. Permasalahan seperti kenaikan struktur dan deformasi tanah yang tidak seragam akan mengakibatkan struktur perkerasan rusak dan umur rencana jalan berkurang. Penyelesaian yang dilakukan untuk mengantisipasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan model perkerasan pelat beton dengan perkuatan tiang. Validasi dengan menggunakan pendekatan numeris metode elemen hingga diperlukan pada sistem tersebut untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih spesifik dan parameter yang sesuai dengan uji model fisik laboratorium. Pemodelan struktur dan analisis pada penelitian ini menggunakan program SAP 2000. Struktur yang dimodelkan pada program sesuai dengan model fisik laboratorium yaitu dua pelat berukuran panjang 70 cm, lebar 30 cm dan tebal 2 cm. Masing-masing pelat didukung oleh susunan kelompok tiang berdiameter 4 cm dan variasi panjang tiang 10 cm dan 20 cm. Simulasi pemodelan struktur pelat dilakukan dengan menggunakan nilai modulus reaksi tanah-dasar (k) sedangkan pada tiang menggunakan nilai k_v, k_h, k_t . Percobaan variasi nilai k_v sebesar $1,6 k_{pengamatan}$ pada kondisi tanah kering dan $10 k_{pengamatan}$ pada kondisi tanah basah menghasilkan lendutan yang paling mendekati dengan lendutan model fisik laboratorium. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai lendutan dipengaruhi oleh beban, panjang tiang, nilai k dan kondisi tanah. Penambahan panjang tiang dan memperbesar nilai k dapat mereduksi nilai lendutan pelat sehingga struktur semakin kaku.

Kata kunci : sistem pelat perkuatan tiang, MEH, lendutan, modulus reaksi tanah dasar

Abstract. Construction of road pavement in expansive soil will causes problems if its not given a special reinforcement treatment. Uneven deformation of ground and heave problem will causes the damage on structures and decreasing the pavement design life. To anticipate the problems is using a model of concrete plate with pile reinforcement system. Therefore, validation by using the numeric approach of the finite element method is needed on the system to get more specific and proper parameters of physical laboratory model. To analyse and modeling structure in this study was using SAP 2000 program. The structure modeled on the program accordance the physical model laboratory which the dimension of the plates are 70 cm length, 30 cm wide and 2 cm thick. Each plates was supported by the group of pile with 4 cm diameter and length variations of pile are 10 cm and 20 cm. Plates structure modeling simulation using the value of modulus of subgrade reaction (k) whereas the pile using the value of k_v, k_h, k_t . The result of trial model using the variations of k_v with $1,6 k_{laboratory}$ on dry condition and $10 k_{laboratory}$ on wet condition are closest to the physical model. Based on the simulation it was obtained the deflection values are influenced by loading, length of pile, k values and soil conditions. Enhance the length of pile and increasing the value of k will reduce the deflection and increase the rigidity of the structures.

Keywords : plate with pile reinforcement system, FEM, deflection, modulus of subgrade reaction

1. Pendahuluan

Konstruksi perkerasan jalan yang dibangun di atas tanah lempung ekspansif sering tidak mencapai umur rencananya. Hal-hal yang dapat mengurangi kinerja perkerasan yaitu kerusakan struktur, pengaruh lingkungan dan deformasi karena kembang-susut tanah ekspansif. Kerusakan yang terjadi dapat berupa kenaikan struktur, retak dan

bergelombang. Oleh karena itu sistem perkerasan jalan harus dirancang tahan lama dengan memperhatikan salah satu aspek berupa aspek geoteknik. Penanganan masalah tersebut sebelumnya telah diusulkan oleh Hardiyatmo (2008), dengan memodelkan struktur perkerasan jalan sistem pelat terpakai dan pondasi cakar ayam modifikasi.

Menurut Suhendro (2006), deformasi struktur dapat di atasi dengan melakukan perbaikan / penggantian tanah pada lapis *subgrade* atau membuat perkerasan yang bersifat kaku. Validasi dengan menggunakan pendekatan numeris diperlukan pada sistem pelat dengan perkuatan tiang untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih spesifik dan lebih cepat daripada uji model fisik laboratorium. Pendekatan numeris dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan program SAP 2000. Penelitian ini merujuk pada perbandingan nilai lendutan yang terjadi pada pelat setelah pembebanan dilaboratorium dan pemodelan SAP 2000. Kemudian, mengkaji pengaruh penambahan tiang sebagai pengaku pelat pada tanah ekspansif.

Penelitian – penelitian terdahulu tentang metode perkerasan kaku telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya yaitu Mohammedzein (1999) melakukan analisis numeris metode elemen hingga pada tanah ekspansif dengan perkuatan tiang. Daloglu (2000) melakukan perbandingan analisis numeris terhadap nilai k menggunakan persamaan Winkler berdasarkan lapisan dan kedalaman tanah. Nasibu (2009) meneliti tentang pengaruh panjang tiang terhadap nilai modulus reaksi *subgrade* pada tanah lempung lunak menggunakan kontribusi nilai k_v dalam sistem perkuatan tiang.

Xiao dkk. (2011) mensimulasi pendekatan numeris terhadap interaksi pondasi tiang dan tanah ekspansif. Pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan diameter kecil $d \approx 0,04L$ dan pemanjangan panjang tiang dapat memberikan hasil yang efektif dalam mereduksi perpindahan tiang ke atas. Kalantari (2012) mengkaji tentang beberapa jenis desain fondasi untuk tanah ekspansif yang memiliki kembang-susut tinggi sehingga analisis potensi pengembangan diperlukan untuk menentukan fondasi yang tepat pada jenis tanah ekspansif tersebut.

Puri (2012) menentukan penambahan nilai koefisien reaksi *subgrade* berdasarkan toleransi penurunan untuk sistem pelat terpaku pada tanah lunak. Modulus reaksi *subgrade* ekuivalen (k') digunakan dalam menentukan lendutan pelat yang dianalisis dengan metode *BoEF* dan memperhitungkan nilai gesekan tiang (*friction pile*).

Puspasari (2013), mengkaji nilai lendutan, momen, dan gaya lintang sistem pelat terpaku pada tanah pasir menggunakan SAP 2000. Puri (2013), menganalisis lendutan pelat terpaku pada model skala penuh dan komparasi dengan uji pembebanan, pelat terpaku menggunakan koperan. Sall (2013), meneliti tentang pengaruh nilai modulus elastis tanah pada sistem pelat beton tanpa tiang dan tanah sebagai elemen pegas (*springs*) pada perpindahan fondasi rakit. Diana (2015) melakukan studi eksperimen tentang akibat dari pemasangan tiang terhadap kenaikan pelat pada tanah ekspansif. Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa memperkuat pelat dengan tiang akan mengurangi nilai kenaikan, dengan panjang tiang 100 mm akan mereduksi 50% - 85% kenaikan pelat dan mereduksi sebanyak 30% gaya *uplift-pressure* daripada pelat tanpa tiang.

Diana dkk. (2017) menganalisis pengaruh perkuatan tiang terhadap kinerja dari sistem pelat terpaku pada tanah ekspansif. Hasil dari penelitian ini membuktikan adanya tiang dapat mereduksi kenaikan (*heave*) antara pelat dan tanah-dasar. Waruwu (2017) meneliti tentang perilaku lendutan pada sistem pelat terpaku dengan tambahan timbunan pada tanah gambut (*peat soil*), penelitian ini menggunakan pembebanan tambahan berupa timbunan tanah dan memperhitungkan adanya penurunan akibat konsolidasi. Puri (2017) menganalisis pengembangan kurva faktor perpindahan tiang untuk menentukan penambahan modulus reaksi *subgrade* pada sistem pelat terpaku, perbedaan pada penelitian ini terdapat pada model benda uji dengan tiang tunggal dan di modelkan diatas tanah lunak untuk mendapatkan kurva perpindahan baru yaitu menunjukkan bahwa penambahan tiang dibawah pelat meningkatkan modulus reaksi tanah-dasar. Kurva faktor perpindahan tiang dari penelitiannya berguna untuk mengestimasi penambahan nilai k .

2. Dasar Teori

Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang memiliki potensi pengembangan dan penyusutan tinggi karena pengaruh kadar air

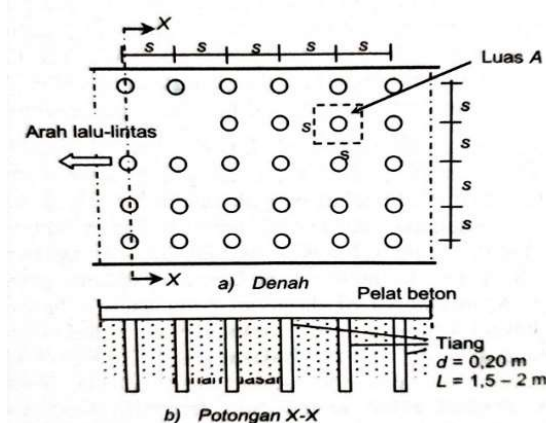
(Hardiyatmo, 2017). Distribusi tanah lempung ekspansif dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sedimentasi dan geologi. Ketika tanah lempung mengembang akan terjadi tekanan pengembangan lalu akan mengangkat bangunan di atasnya. Menurut Muntohar (2014), beberapa kerugian yang disebabkan oleh tanah mengembang yaitu adanya pengembangan vertikal (*heave*) dan retak (*cracking*) permukaan jalan raya dan *buckling* pada perkerasan kaku.

Pengembangan dan Penyusutan Tanah Ekspansif

Menurut Snethen (1984), potensi pengembangan (*swelling potential*) merupakan perubahan volume / deformasi benda uji terhadap tinggi awal benda uji tanah dengan pengujian konsolidasi pada contoh tak terusik (*undisturbed*) pada kadar air dan kepadatan lapangan dan dibasahi hingga jenuh dengan beban sesuai tekanan *overburden* ditempat.

Sistem Pelat Terpaku

Hardiyatmo (2008) telah mengusulkan penyelesaian masalah untuk kerusakan perkerasan jalan akibat tanah lunak atau tanah ekspansif menggunakan perkerasan beton sistem pelat terpaku (*Nailed Slab System*). Sistem pelat terpaku ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2017).

Sistem ini menggunakan perkerasan beton bertulang (tebal antara 12-20 cm) yang didukung oleh tiang-tiang beton mini (panjang 150 – 200 cm dan diameter 15 – 20 cm). Tiang-tiang dan pelat dihubungkan secara monolit untuk menciptakan suatu perkerasan

yang kaku dan tahan terhadap deformasi tanah-dasar.

Metode Evaluasi Kinerja Sistem Pelat Terpaku

Menurut Hardiyatmo (2009), untuk mengevaluasi kinerja sistem pelat terpaku dapat dilakukan dengan cara membebani pelat untuk mengetahui perilaku antara beban dan lendutan yang dinyatakan dalam modulus reaksi tanah dasar (*Modulus of Subgrade Reaction, k*). Penentuan nilai *k* untuk pelat dengan tebal relatif tipis diperoleh dari hubungan tekanan dan lendutan yang merupakan lendutan rerata di sepanjang pelat. Perhitungan lendutan pelat yang terjadi pada sistem pelat terpaku menggunakan teori balok pada fondasi elastik (*Beam on Elastic Foundation, BoEF*) (Hetenyi, 1974). Apabila struktur pelat terpaku didukung oleh kelompok tiang dengan panjang tertentu maka akan terjadi reduksi lendutan akibat tiang.

Modulus Reaksi Tanah-Dasar (*k*)

Perancangan perkerasan beton dengan Sistem Pelat Terpaku, diperlukan nilai modulus reaksi *subgrade* (vertikal) yang didefinisikan sebagai:

$$k = \frac{P}{\delta} \quad (1)$$

dengan,

k = modulus reaksi tanah-dasar (kN/m^3)

p = beban persatuan luas pada pelat (Q/A) (kN/m^2)

Q = beban titik (kN)

A = luas pelat beban (m^2)

δ = defleksi atau penurunan rata-rata pelat (m)

Untuk beban pelat ukuran tertentu modulus reaksi tanah-dasar dinyatakan oleh persamaan (Teng, 1981) :

$$k_f = k_l \frac{B_1}{B_f} \quad (2)$$

dengan,

k_f = modulus reaksi tanah-dasar pada pelat dengan lebar *B_f*

k_l = modulus reaksi tanah-dasar dari hasil uji beban pelat selebar *B₁*.

Pemasangan tiang yang monolit pada pelat beton dapat menaikkan modulus reaksi *subgrade* (*k*) (Hardiyatmo, 2011). Penelitian ini menggunakan nilai *k* dari hasil pengujian model fisik laboratorium pelat lingkaran tanpa

tiang yang kemudian dikoreksi sesuai dengan bentuk pelat model persegi panjang. Nilai k yang digunakan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai k

Kondisi Tanah	k (kg/cm ³)	
Kering	k tanpa tiang	3,5978
	k koreksi	7,1955
	k percobaan	11,5128
Basah	k tanpa tiang	0,2487
	k koreksi	0,4973
	k percobaan	4,9733

Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mendapatkan pendekatan praktis terhadap interaksi antara struktur dan tanah-dasar pada perencanaan perkerasan kaku (*rigid pavement*). Sistem pelat terpaku merupakan pengembangan dari sistem cakar ayam modifikasi (Suhendro, 2006).

Tanah Sebagai Elemen Pegas (*spring*)

Spring dianggap mampu mewakili kondisi tanah di lapangan karena tanah mempunyai sifat linier dalam merespon beban, sehingga direpresentasikan sebagai modulus reaksi *subgrade* vertikal, dan tanah disekitar tiang dimodelkan sebagai *spring* horizontal yaitu merepresentasikan modulus reaksi *subgrade* horizontal.

Elemen Shell pada Metode Elemen Hingga

Menurut Cook dkk. (1994), elemen *shell* digambarkan dengan ketebalan tipis dan bentuk permukaan bidang terpusatnya (*midsurface*).

3. Metode Penelitian

Tahapan Penelitian

Penelitian ini merupakan analisis numeris dari perilaku deformasi yang terjadi pada pelat dengan perkuatan tiang akibat pembebanan di atasnya. Analisis dilakukan dengan memodelkan benda uji pada *software* SAP 2000. Tahapan penelitian sebagai berikut:

- 1) Studi pustaka dan pengumpulan data
Data yang dikumpulkan berupa data nilai k dan data pengujian model fisik laboratorium.

- 2) Pemodelan struktur
Struktur dimodelkan dengan menggunakan program SAP 2000 dengan memasukkan nilai k pada struktur pelat menggunakan elemen *spring* dan nilai k_v, k_h, k_t pada tiang.
- 3) Analisa dan validasi data *running model*
Menganalisa data hasil *running data* kemudian memvalidasi data dengan hasil lendutan model fisik laboratorium.

Parameter Material

Material tanah

Pada penelitian ini tanah dimodelkan sebagai elemen linier elastik dan nilai koefisien reaksi tanah-dasar diperoleh berdasarkan uji laboratorium pada tanah ekspansif dengan spesifikasi seperti Tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Tanah Uji Laboratorium

Uraian	Nilai
Kadar air awal (%)	15,30
<i>Specific Gravity</i> (Gs)	2,69
Batas cair, <i>LL</i> (%)	95,80
Batas plastis, <i>PL</i> (%)	29,13
Batas susut, <i>SL</i> (%)	10,90
Indeks Plastisitas, <i>PI</i> (%)	66,66
Persen fraksi butiran lolos saringan no.200 (%)	89,66
Klasifikasi AASTHO	A-7-6
Klasifikasi USCS	CH
Berat volume kering maksimum (kN/m ³)	13,64
Kadar air optimum (%)	14,90
Persen Pengembangan (%)	13,56
Tekanan Pengembangan (KPa)	140
Aktifitas Tanah, <i>A</i>	3,1

Material Tulangan

Tulangan dimodelkan pada SAP 2000 menggunakan tulangan ukuran 6d yang mendekati dengan dimensi tulangan yang digunakan di laboratorium.

Material Beton

Material pelat dan tiang menggunakan beton dengan asumsi beton sebagai linier elastik dengan parameter berupa modulus elastisitas beton pada beban simetris menggunakan metode *conjugated beams*.

Parameter Input Analisis

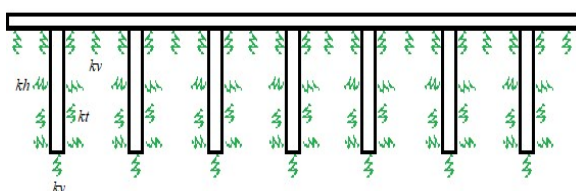
Parameter data *input* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Parameter penelitian pada SAP2000

Parameter	Nilai
Modulus reaksi tanah-dasar (k)	$k_{pengamatan}$
Modulus reaksi tanah-dasar vertikal (k_v)	$1-10k_{pengamatan}$
Modulus reaksi tanah-dasar horizontal (k_h)	$2k_v$
Modulus reaksi tanah-dasar tiang (k_t)	$0,5k_v$
Beban titik dipusat pelat (kg)	50, 100, 190
Kuat tekan beton, f_c (Mpa)	25
Modulus elastisitas beton, E (Mpa)	584746,9
Dimensi tiang beton	
Diameter tiang (cm)	4
Panjang tiang 1 (cm)	10
Panjang tiang 2 (cm)	20
Jarak antar tiang (cm)	10
Dimensi pelat beton	
Panjang pelat (cm)	70
Lebar pelat (cm)	30
Tebal pelat (cm)	2

Idealisasi Pemodelan dengan Variasi k_v, k_h, k_t pada Struktur

Penelitian ini menggunakan variasi nilai modulus reaksi tanah-dasar (k) sesuai dengan hasil pembebanan struktur pelat tiang tunggal pada kondisi tanah kering dan kondisi tanah basah (*swelling*) uji laboratorium. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan tiang sebagai elemen *frame* variasi panjang tiang 10 cm dan 20 cm. Nilai k dimodelkan sebagai elemen *spring* dengan variasi modulus reaksi tanah-dasar (k) yang diperoleh dari uji model fisik pelat tanpa tiang adalah k vertikal (k_v), k horizontal (k_h) dengan nilai antara $2k_v$ dan koefisien gesek tiang (k_t) sebesar $0,5k_v$. Idealisasi variasi k_v, k_h dan k_t dapat dilihat pada Gambar 2.



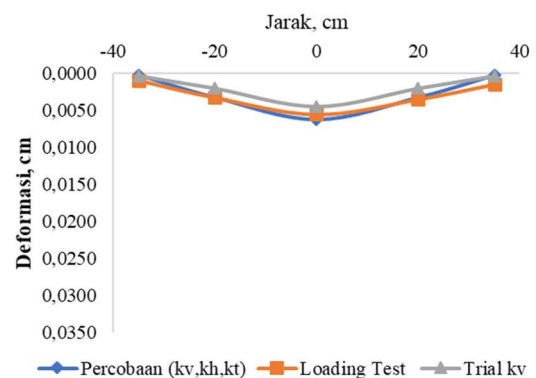
Gambar 2 Idealisasi Nilai k

Untuk mendapatkan hasil lendutan yang mendekati dengan model fisik laboratorium digunakan percobaan variasi nilai $k = 1,6 k_{pengamatan}$ pada kondisi tanah kering dan $k = 10 k_{pengamatan}$ pada kondisi tanah basah.

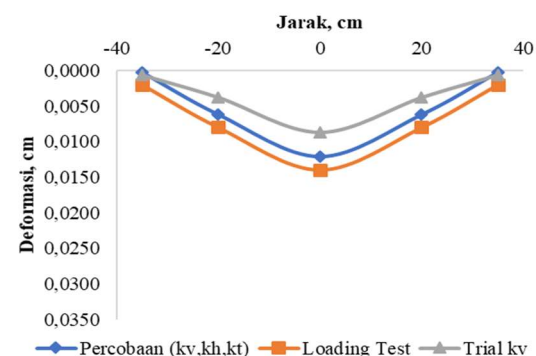
4. Hasil dan Pembahasan

Analisis Nilai Lendutan Struktur Pada Kondisi Tanah Kering

Hubungan antara beban dan lendutan pada pengujian laboratorium lebih lanjut disebut dengan $k_{pengamatan}$ dan pemodelan k_v, k_h, k_t pada SAP 2000 di tampilkan pada Gambar 3. Diperoleh perbandingan nilai lendutan dari pemodelan SAP 2000 tidak mendekati hasil model fisik laboratorium hal ini dikarenakan program SAP menganalisis struktur secara keseluruhan dan lebih kompleks. Modulus reaksi *subgrade* yang diberikan pada pemodelan tiang dan pelat tidak menunjukkan peningkatan daya dukung yang signifikan terutama pada pusat pelat akibat pembebanan sehingga nilai lendutan di pusat pelat pada SAP 2000 lebih besar dari pada model fisik.



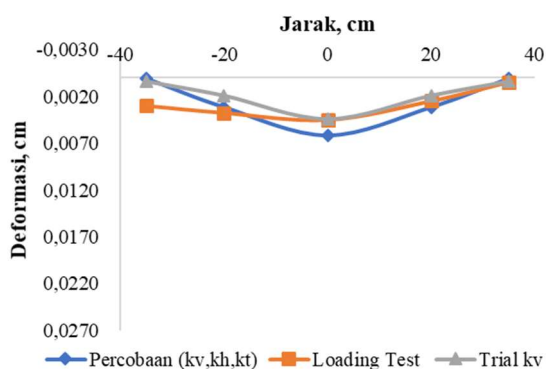
Gambar 3 Perbandingan Nilai Lendutan Tiang Panjang 20 cm Beban 50 kg



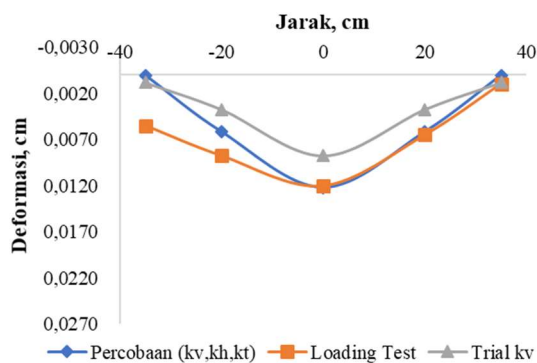
Gambar 4 Perbandingan Nilai Lendutan Tiang Panjang 20 cm Beban 100 kg

Untuk mendapatkan hasil lendutan yang mendekati nilai lendutan model fisik dilakukan percobaan (*trial*) nilai k_v sebesar $1,6 k_{pengamatan}$ sehingga diperoleh nilai k_v, k_h, k_t baru dan nilai lendutan yang diperoleh mendekati model fisik laboratorium.

Pemodelan struktur pelat dengan perkuatan tiang dengan menggunakan nilai $k = 1,6 k_{pengamatan}$ menghasilkan nilai lendutan yang paling mendekati uji fisik laboratorium sehingga dengan memperbesar nilai k akibat daya dukung tiang akan mereduksi nilai lendutan pelat.



Gambar 5 Perbandingan Nilai Lendutan Tiang Panjang 10 cm Beban 50 kg.



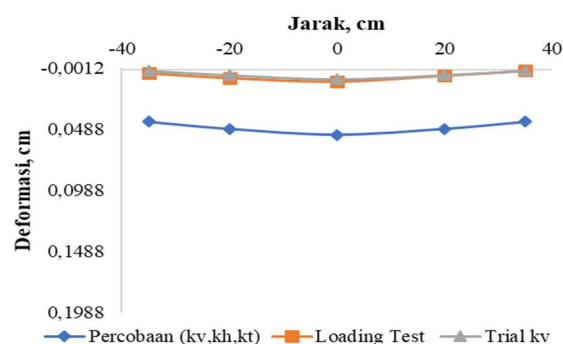
Gambar 6 Perbandingan Nilai Lendutan Tiang Panjang 10 cm Beban 100 kg.

Tabel 3 Selisih lendutan kondisi kering

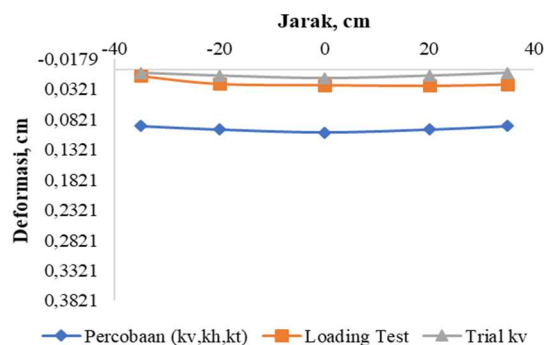
Panjang Tiang	Variasi	Selisih Lendutan (%)		
		Beban (kg)		
		50	100	190
20	kv,kh,kt	11,9	-13,2	-34,4
	Trial kv	-20,1	-37,9	-53,1
10	kv,kh,kt	36,9	1,8	-14,4
	Trial kv	-1,9	-27,0	-38,6

Analisis Nilai Lendutan Struktur Pada Kondisi Tanah Basah

Perbandingan nilai lendutan dari pemodelan SAP 2000 untuk kondisi tanah basah tidak mendekati hasil model fisik laboratorium dan modulus reaksi *subgrade* dari $k_{pengamatan}$ yang diberikan pada pemodelan tidak menunjukkan peningkatan reduksi lendutan yang signifikan terutama pada pusat pelat akibat pembebanan sehingga nilai lendutan di pusat pelat pada model SAP 2000 lebih besar dari pada model fisik. Untuk mendapatkan hasil yang mendekati nilai lendutan model fisik dilakukan *trial* dengan variasi $k = 10 k_{pengamatan}$.



Gambar 7 Perbandingan Nilai Lendutan Tiang Panjang 20 cm Beban 50 kg (Kondisi Basah).



Gambar 8 Perbandingan Nilai Lendutan Tiang Panjang 10 cm Beban 50 kg (Kondisi Basah).

Tabel 4 Selisih lendutan kondisi basah

Panjang Tiang	Variasi	Selisih Lendutan (%)		
		Beban (kg)		
		50	100	190
20	kv,kh,kt	435,0	276,4	109,3
	Trial kv	-20,0	-43,2	-68,3
10	kv,kh,kt	315,2	163,9	49,3
	Trial kv	-80,3	-65,2	-80,3

Dari hasil analisis tiang pada kondisi tanah basah dan kering menunjukkan perbedaan nilai lendutan yaitu nilai lendutan pada tanah ekspansif basah jauh lebih besar daripada kondisi kering dan panjang tiang juga berpengaruh terhadap daya dukung struktur. Penambahan nilai k menjadi $10 k_{pengamatan}$ menghasilkan lendutan yang mendekati uji model fisik laboratorium. Pemodelan SAP 2000 tiang 10 cm menunjukkan tiang panjang 20 cm memiliki lendutan yang lebih kecil daripada tiang 10 cm.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis struktur dapat disimpulkan bahwa :

1. Pelat yang diperkuat dengan tiang menghasilkan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dengan pelat tanpa perkuatan tiang. Nilai lendutan yang di peroleh dengan analisis metode elemen hingga pada SAP 2000 tidak mendekati nilai lendutan pada model fisik laboratorium. Percobaan variasi nilai k_v adalah $1,6 k_{pengamatan}$ pada kondisi tanah kering dan $10 k_{pengamatan}$ pada kondisi tanah basah menghasilkan lendutan yang lebih kecil dari pada lendutan dengan $k_{pengamatan}$ sebelumnya.
2. Menambah panjang tiang tanpa memperbesar diameter tiang dapat mereduksi lendutan pada kondisi tanah basah.
3. Pada kondisi tanah basah nilai k untuk struktur pelat dengan tiang lebih kecil daripada struktur dengan panjang tiang yang sama pada kondisi kering sehingga lendutan pelat pada kondisi tanah basah lebih besar.

6. Daftar Pustaka

- Cook, R.D., 1995, *Finite Element Modelling For Stress Analysis*, John Wiley Sons inc: Canada.
- Daloglu, A.T., dan Vallabhan, C.V.G., 2000, Values of k for Slab on Winkler Foundation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 463-471.
- Diana, W., Hardiyatmo, H.C., 2015, Experimental Study on Expansive Soil: The Effect of Pile Installation on Slab Heave. *The 10th International Forum on Strategic Technology*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 3-5 June.
- Diana, W., Hardiyatmo, H.C., dan Suhendro, B., 2017, Effect of Pile Connections on The Performance of The Nailed Slab System on The Expansive Soil. *International Journal of Geomate*, 12(32), 134-141.
- Hardiyatmo, H.C., 2008, Sistem Pelat Terpakai (*Nailed Slab System*) Untuk Perkuatan Pelat Beton Pada Tanah Ekspansif. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana*: MPSP-FT-UGM, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., 2009, Metoda Hitungan Lendutan Pelat dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekuivalen Untuk Struktur Pelat Fleksibel. *Dinamika Teknik Sipil*, 9(2), 149-154.
- Hardiyatmo, H.C., 2011, Method To Analyze The Deflection Of The Nailed Slab System. *International Journal of Civil and Engineering (IJCEE-IJENS)*, 11(4), 22-28.
- Hardiyatmo, H.C., 2017, *Tanah Ekspansif Permasalahan dan Penanganan*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hetenyi, M, (1974), *Beam on Elastic Foundation*, Ann Arbor: The University Of Michigan Press.
- Horvarth, J.S., ASCE, M., 1983, Modulus of Subgrade Reaction: New Perspective. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(12), 1591-1596.
- Kalantari, B., 2012, Foundations on Expansive Soils: A Review. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, 4(18), 3231-3237.
- Mohamedzein, Y.E-A., 1999, Finite Element Analysis Of Short Piles in Expansive Soils. *International Journal of Computers and Geotechnics*, 24 (1999), 231-243.
- Muntohar, A.S., 2014, *Mekanika Tanah*. Lembaga Pengembangan Penelitian, Publikasi, dan Masyarakat (LP3M),

- Universitas Muhammadiyah Yogyakarta: Yogyakarta.
- Nasibu, R., 2009, *Kajian Pengaruh Tiang Pada Nilai Modulus Reaksi Subgrade (kv) Pada Uji Beban Skala Penuh*, Tesis S-2, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., dan Suhendro, B., 2012, 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(3), 32-40.
- Puri, A. dan Hardiyatmo, H.C., 2013, Behaviour of Fullscale Nailed-Slab System With Variation on Load Positions. *1st International Conference on Infrastructure Development: UMS*, Surakarta, 1-3 November.
- 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*, 1(2017), 122-131.
- Puspasari, V., 2013, *Analisis Lendutan, Momen Dan Gaya Lintang Pada Sistem Pelat Terpaku Dengan Menggunakan SAP 2000*, Tesis S-2, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Sall, O.A., Fall, M., dan Berthaud, Y., 2013, Influence of the Elastic Modulus of the Soil and Concrete Foundation on the Displacement of a Mat Foundation. *Journal of Civil Engineering*, 3, 228-233.
- Snethen, D.R., 1984, Evaluation of Expedient Methods for Identification and Classification of Potential Expansive Soil. *National Conf. Publication Proceedings 5th International Conferences on Expansive Soil*, 84(3), 22-26, South Australia, 21-23 May.
- Somantri, M.A., 2013, *Kajian Lendutan Pada Sistem Pelat Terpaku Menggunakan Metode Beam on Elastic Foundation dan Metode Elemen Hingga*, Tesis S-2 Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suhendro, B., 2006, *Sistem Cakar Ayam Modifikasi Sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di atas Tanah Lunak*, 60 Tahun RI, Jakarta.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H.C., dan Rifa'I, A., 2017, Deflection Behaviour of The Nailed Slab System-Supported Embankment on Peat Soil. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(4), 556-563.
- Xiao, H.B., Zhang, C.S., dan Wang, Y.H., 2011, Pile-Soil Interaction in Expansive Soil Foundation: Analytical Solution and Numerical Simulation. *International Journal of Geomechanics*, 11(3), 159-166.