

MEKANISME TRANSFER BEBAN FONDASI KONSTRUKSI SARANG LABA-LABA MELALUI UJI BEBAN STATIS VERTIKAL SKALA PENUH DAN ANALISIS NUMERIK 3D UNTUK KONDISI SMALL STRAIN

Helmy Darjanto¹, Masyhur Irsyam², Sri Prabandiyani Retno W³

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Narotama, Surabaya

²Program Studi Teknik Sipil, ITB, Bandung

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang

Email: helmy.darjanto@narotama.ac.id

ABSTRAK

KSSL karya anak bangsa yang dikategorikan sebagai fondasi dangkal dan terdiri dari dua bagian struktur yaitu pelat dan rib sebagai pengaku, Djajaputra et al (2009) dan Pane (2011-2012), namun dari penelitian-penelitian tersebut bahwa mekanisme pengalihan beban hingga ke tanah dasar belum diteliti secara menyeluruh. Dilakukan uji beban statis/static load test (SLT) skala penuh hingga failure (60 ton) terhadap prototipe KSSL dengan dimensi 2,6m x 2,6m. Prosedur SLT (axial compressive load) mengikuti standar ASTM D 1143-81 (Reapproved 1987) dengan sistem “Quick Maintained Load Test” dan cyclic loading. Akurasi pengamatan penurunan juga menggunakan alat LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) selain dengan 8 buah dial gauge dengan ketelitian 0,01 mm dan akurasi pembebanan menggunakan alat load cell dengan kapasitas 500 ton. Pemasangan strain gauge pada tulangan rib dan pelat, juga pada permukaan beton sisi rib dilakukan untuk mengamati regangan yang terjadi pada tulangan dan beton KSSL selama uji beban dilaksanakan. Dari hasil penyelidikan tanah di area uji merupakan tanah lempung kelanauan dengan nilai NSPT = 3 hingga kedalaman 3,0 m sedangkan pada kedalaman 3,0 m – 7,0 m nilai NSPT = 6 dan pada kedalaman 8,0 m – 11,0 m, nilai NSPT = 2 – 3. Hasil penelitian pada saat beban kerja berada di bagian rib atau berada di titik 4, maka mekanisme transfer beban yang terjadi sepenuhnya dipikul oleh rib dan diteruskan ke tanah di bawahnya melalui ujung tip. Pemetaan MTB menggunakan rasio daya dukung tanah ultimit KSSL (Rib dan Pelat) terhadap beban uji yang selanjutnya disebut Load Ratio Factor (L-URF). Kondisi ini terjadi ketika beban diberikan sebesar 8 ton maka seluruh beban dipikul oleh kuat dukung RSisi dengan L-URF=3,75. Sedangkan saat beban diberikan sebesar 30 ton maka seluruh beban dipikul oleh rib, pelat, dan tanah pengisi dengan L-URF=3,4 kemudian shear strain maksimal yang terjadi adalah sebesar 0,744 di sekitar sisi luar dari rib settlement dan di bawah ujung rib tersebut tersebar ke tanah di bawahnya dan relative shear stress yang terjadi adalah sebesar 0,93. Hasil penelitian terhadap uji beban statis menunjukkan bahwa kondisi small displacement terjadi pada beban 8 ton dan 15 ton. Kinerja KSSL terhadap hasil penurunan masing-masing pembebanan pada zona small displacement (beban; penurunan-load; penurunan-unload) adalah (8 ton; 0,87 mm; 0,32mm) dan (15 ton; 1,19 mm; 0,21 mm). Kemudian hasil pengamatan strain gauge yang terjadi pada: Rib Konstruksi masih < 250 μ , Pelat < 800 μ , dan Permukaan Beton < 1000 μ atau semua regangan yang terjadi masih dalam batas small strain. Hubungan kekakuan perkerasan KSSL untuk beban 8 ton dibandingkan dengan kekakuan ekuivalen perkerasan kaku terhadap deformasi yang terjadi adalah identik dimensi pelat setebal 20 cm. Mekanisme transfer beban dapat diungkapkan dengan baik secara numerik dengan terkalibrasi dari hasil uji lapangan. Secara praktis, dengan penggunaan pemodelan baik skala prototipe dan numerik dapat dikembangkan sistem KSSL untuk perkerasan jalan.

Kata kunci: Mekanisme Transfer Beban, Tanah Lempung Lunak, Fluktuasi Muka Air Tanah

PENDAHULUAN

Fondasi Konstruksi Sarang Laba-Laba (KSSL) adalah fondasi karya anak bangsa yang dikategorikan sebagai fondasi dangkal dan terdiri dari dua bagian struktur yakni pelat dan rib sebagai pengaku. Fondasi ini sering digunakan pada gedung-gedung dengan jumlah lantai < 6 lantai. Penelitian fondasi KSSL sudah dilakukan beberapa kali namun dari penelitian-penelitian tersebut yang terkait mekanisme transfer beban dari fondasi KSSL terhadap beban vertikal belum sepenuhnya diteliti kondisi pengalihan beban hingga ke tanah dasar. Penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait yang pernah dilakukan diantaranya oleh Suhendro (1992, 2005) mengembangkan pemodelan numeris yang memperhitungkan *soil-structure interaction* (interaksi antara struktur slab, pipa, dan tanah dasar) dalam mendukung beban, menggunakan *Nonlinear 3-D Finite Element Method*, Hardiyatmo et al. (2000) mengusulkan suatu metode dengan melakukan kombinasi persamaan-persamaan balok pada fondasi elastis (*Beam on Elastic Foundation*, BoEF) dengan gaya-gaya perlawanan momen pada cakar-cakar (fondasi pipa) yang diakibatkan oleh reaksi tekanan tanah lateral di sekitar cakar, Anderson et al. (2007) melakukan pengujian beban statis vertikal skala penuh pada fondasi dangkal di lapangan dengan tanah dasar berpasir. Penelitiannya fokus terhadap penurunan elastis yang terjadi, kemudian hasilnya dibandingkan terhadap teori tradisional, Srilakshmi dan Rekha (2011) melakukan simulasi pemodelan 2D aksisimetris metode elemen hingga pada uji skala penuh fondasi rakit/*mat* untuk mendapatkan pola keruntuhan dan penurunan elastis pada tanah pasir medium, Djajaputra et al. (2009) melakukan uji beban statis skala penuh di area *apron* dan *taxiway* bandara Tarakan, kemudian melakukan analisis terhadap kuat dukung tanah dengan menggunakan persamaan Terzaghi dan Teori Winkler terhadap hasil pengujian deformasi terjadi dalam kondisi elastis, sedangkan Darjanto et al. (2013) melakukan uji beban statis skala penuh pada prototipe dari modular KSSL dengan dimensi 2,65 m x 2,65 m di atas tanah lunak hingga *failure* (60 ton) untuk melakukan analisis mekanisme transfer beban dari *tip*, ke sisi *rib* dan ke pelat KSSL.

METODE PENELITIAN

Perbedaan antara fondasi pelat biasa dan fondasi KSSL adalah adanya *rib* sebagai pengaku. Penggunaan fondasi pelat biasa sebagai perkerasan jalan sering menimbulkan rongga-rongga di antara pelat dan tanah yang hal itu disebabkan oleh beban repetisi dari roda kendaraan. Pada musim hujan rongga-rongga tersebut akan mudah terisi oleh air sehingga terjadi pembuburan atau menurunnya kuat geser tanah yang menyebabkan berkurangnya kontribusi dukungan tanah dasar terhadap pelat saat pelat dibebani, sehingga pelat mudah rusak/retak. Oleh karenanya dibutuhkan sistem fondasi yang mampu menjamin bidang kontak antara pelat dan tanah selalu bersentuhan (tidak terjadi *gap*) selama masa layan struktur, maka kuat dukung tanah terjaga, dan pelat sendiri tetap terjamin mutunya sehingga tahan lama/awet. Kondisi tersebut diharapkan yakni beban roda akan direspon oleh kekuatan pelatnya sendiri bersama-sama reaksi tanah di bawahnya. Terzaghi (1943) adalah yang pertama menyajikan teori yang komprehensif untuk evaluasi kuat dukung ultimit fondasi dangkal. Menurut teorinya suatu fondasi dikatakan dangkal jika kedalaman perletakan, D_f , adalah kurang atau sama dengan lebar fondasinya. Kemudian peneliti sesudahnya telah menyarankan bahwa fondasi dengan D_f sama dengan 3 – 4 kali lebar fondasi dapat didefinisikan sebagai fondasi dangkal, Das (2011).

Fondasi *mat*/rakit adalah fondasi pelat beton dalam skala besar yang pada umumnya digunakan untuk meneruskan beban dari beberapa baris kolom dari suatu bangunan gedung. Penyelesaian untuk menentukan kuat dukung dan analisis deformasi fondasi menggunakan persamaan Terzaghi (1943) dan Teori Winkler. Djajaputra et al. (2009) dalam penelitiannya terhadap kuat dukung tanah dan analisis fondasi KSSL masing-masing

menggunakan persamaan Terzaghi (1943) dan Teori Winkler (1867). Adapun persamaan kuat dukung Terzaghi (1943) dituliskan sebagai berikut pada Persamaan 2.1 sebagai berikut

$$Q_u = 1,3 * c_u * N_c + \gamma * q * N_q + 0,4 * \gamma * B * N_\gamma \quad (2.1)$$

Oleh karena fondasi atau perkerasan KSSL memiliki *rib* maka kuat dukung fondasi perlu dikoreksi terhadap adanya kuat dukung ujung (*tip*) dan kuat dukung sisi dari *rib* tersebut. Adapun persamaan masing-masing kuat dukung tersebut menurut Das (2004) dirumuskan sesuai Persamaan (2.1a-c).

$$Q_{(tip-rib)Ult} = A_p * c_u * N'_c \quad (\text{lempung}) \quad (2.1.a)$$

$$Q_{(side-rib)Ult} = \alpha * c_u * A_s \quad (\text{lempung}) \quad (2.1.b)$$

$$Q_{(side-rib)Ult} = K * \overline{\sigma_0}' * \tan(0.8\phi') * A_s \quad (\text{pasir}) \quad (2.1.c)$$

notasi:

A_p : luasan ujung *rib* (m²)

A_s : luasan sisi *rib* (m²)

c_u : kuat geser tanah *undrained* (kN/m²)

$N'_c = 9$, faktor kapasitas kuat dukung

K : koefisien tekanan tanah lateral

$\overline{\sigma_0}'$: tekanan *overburden* efektif rata-rata (kN/m²)

ϕ' : sudut geser tanah efektif (°)

Solusi klasik Winkler (1867) adalah menganggap fondasi sebagai bantalan pegas. Solusi klasik tidak umum digunakan dalam aplikasi metode elemen hingga. Persamaan 2.2 adalah persamaan diferensial dasar teori klasik Winkler (1867)

Model Elemen Hingga merupakan cara numerik dalam menyelesaikan masalah dalam ilmu rekayasa dan matematika fisik. Cakupan penyelesaiannya dari kedua masalah ini berupa analisis struktur, transfer panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensial elektromagnetik

Sifat-sifat material tanah perlu diindikasikan awal sebelum dilakukan analisa numerik pemodelan tanah karena hal ini sangat penting dan utama untuk melakukan estimasi terhadap perilaku tanah. Sifat-sifat material tanah dapat dibagi menjadi 4 segmen yakni:

1. Sifat-sifat indeks dasar tanah: klasifikasi tanah, aktifitas tanah, distribusi ukuran partikel tanah, *density* tanah, plastisitas tanah, kelembaban dan saturasi tanah, tekstur tanah dan sejarah tegangan tanah,
2. Sifat-sifat kompresibilitas tanah: konsolidasi primer, identifikasi nilai K_0 , angka pori awal, uji *Triaxial* lanjut untuk mendapatkan nilai index kompresi dan kembang termodifikasi (λ , κ),
3. Sifat-sifat kuat geser tanah yang oleh Mitchell (1993) dinyatakan bahwa tahanan geser itu adalah fungsi dari angka pori (e), sudut geser tanah (ϕ), komposisi tanah (C), tegangan normal efektif (σ), kohesi tanah (c), sejarah tegangan (H), suhu (T), regangan (ε), kecepatan regangan ($\dot{\varepsilon}$), dan struktur (S) atau dalam lambang matematik ditulis sebagai: tahanan geser = $F(e, \phi, C, \sigma, c, H, T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, S)$,
4. Sifat-sifat deformasi tanah terkait dengan nilai kekakuan tanah: modulus *bulk* (K), modulus geser (G), modulus *Young* (E), modulus *Oedometer* (E_{oed}), modulus *Secant* (E_{sec}), modulus secant pada 50% tegangan maksimum (E_{50}). Menurut Powrie (1997) penggunaan E_{sec} lebih sering digunakan karena lebih mudah untuk ditentukan nilainya.

Analisis numerik adalah suatu teori penyelesaian matematis kontinum untuk memecahkan masalah. Pemecahan masalah seperti perilaku mekanis dari tanah pada dasarnya dapat dimodelkan pada berbagai tingkat akurasi. Plastisitas dihubungkan dengan terbentuknya

regangan yang berdeformasi tetap. Untuk mengevaluasi apakah telah terjadi plastisitas dalam perhitungan, sebuah fungsi leleh (*yield function*), f , dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan dan regangan. Sebuah fungsi leleh umumnya dapat dinyatakan sebagai suatu bidang dalam ruang tegangan utama. Sesuai dengan metode elemen hingga, sebuah kontinum dibagi menjadi sejumlah elemen (volumetrik). Setiap elemen memiliki sejumlah titik nodal. Setiap titik nodal mempunyai sejumlah derajat kebebasan yang berkaitan dengan nilai diskret dari variabel yang tidak diketahui dalam permasalahan nilai batas yang akan diselesaikan. Dalam kasus deformasi ini, derajat kebebasan berkaitan dengan komponen perpindahan.

Model material merupakan suatu persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara tegangan dan regangan. Model material seringkali dinyatakan dalam bentuk dimana suatu peningkatan tegangan tertentu (atau perubahan tegangan) dihubungkan dengan suatu peningkatan regangan tertentu (atau perubahan regangan). Aplikasi model yang digunakan untuk melakukan uji prediksi balik umumnya secara bertahap dari yang biasa hingga model lanjut yakni aplikasi model dari Mohr-Coulomb (MC) dan model *Hardening Soil Small-strain* (HSS). Model tingkat lanjut ini digunakan apabila: deformasi menjadi masalah utama, dan data geoteknik (laboratorium dan lapangan) tersedia dengan baik. Oleh karenanya model lanjut ini pada umumnya digunakan sebagai analisis akhir/final pada penyelesaian permasalahan geoteknik.

Uji beban statis atau *static load test* (SLT) bertujuan untuk mengetahui respon fondasi pelat/perkerasan terhadap suatu pembebanan statis. Prosedur SLT (*axial compressive load*) mengikuti standar ASTM D 1143-81 (*Reapproved 1987*) dengan sistem “*Quick Maintained Load Test*” dan *cyclic loading*. Sedangkan prosedur dan tahapan pembebanan siklis adalah sesuai Tabel 1&2 berikut ini:

Tabel 1. Prosedur dan Tahapan Pembebanan 8 ton

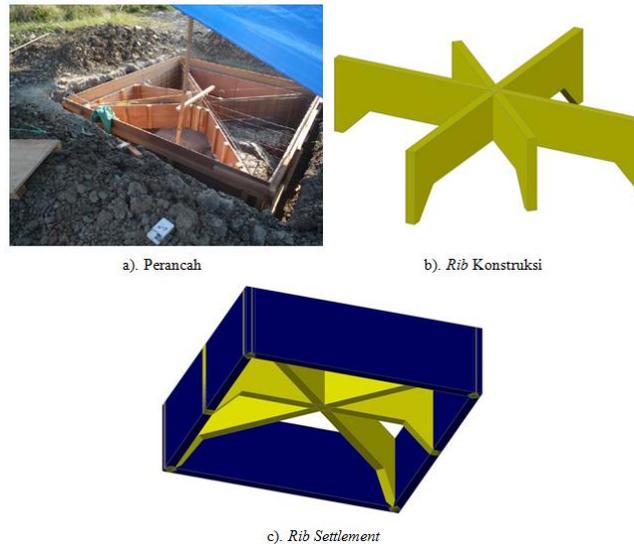
SIKLIS 1 BEBAN / LAMANYA	SIKLIS 2 BEBAN / LAMANYA
0/-	0/-
2 ton/5 menit	4 ton/5 menit
4 ton/5 menit	8 ton/10 menit
2 ton/5 menit	4 ton/5 menit
0/10 menit	0/10 menit

Tabel 2. Prosedur dan Tahapan Pembebanan 60 ton

SIKLIS 1 BEBAN / LAMANYA	SIKLIS 2 BEBAN / LAMANYA	SIKLIS 3 BEBAN / LAMANYA	SIKLIS 4 BEBAN / LAMANYA
0/-	0/-	0/-	0/-
8 ton/5 menit	8 ton/5 menit	8 ton/5 menit	15 ton/5 menit
15 ton/10 menit	15 ton/5 menit	15 ton/5 menit	30 ton/5 menit
8 ton/5 menit	30 ton/10 menit	30 ton/5 menit	45 ton/5 menit
0/10 menit	15/5 menit	45 ton/10 menit	60 ton/10 menit
	8 ton/5 menit	30 ton/5 menit	45 ton/5 menit
	0/10 menit	15 ton/5 menit	30 ton/5 menit
		8 ton/5 menit	15 ton/5 menit
		0/10 menit	0/10 menit

KONFIGURASI EXPERIMEN

Untuk pembuatan benda uji 2,6 x 2,6 m sesuai desain rencana diperlukan penggalian tanah sedalam 0,5 meter dengan area galian sebesar/seluas 3x3 meter. Setelah penggalian maka langkah berikutnya adalah memasang tulangan *rib* (Gambar 1).



Gambar 1. Pembuatan Perancah Rib (Konstruksi dan *Settlement*) KSSL

Pemasangan instrumen *strain gauge* jenis FLA-5-11 untuk tulangan baja dan PL-60-11 pada permukaan beton harus dilakukan penuh kehati-hatian agar instrumen tersebut dapat bekerja dengan baik karena instrumen *strain gauge* ini ukurannya mini.

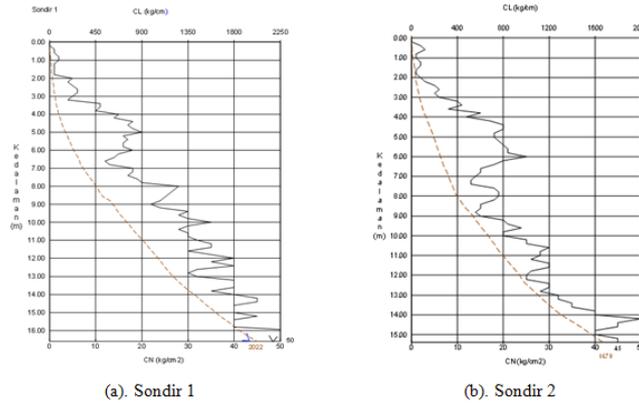
Pengujian beban statis skala penuh (*Static Load Test: SLT*) terhadap protipe KSSL ukuran 2,6 m x 2,6 m dengan rencana beban hingga 60 ton menggunakan alat berat tiang injeksi 300 ton. Beban perlawanan yang terpasang tidak sepenuhnya diberikan (300 ton) tetapi hanya ± 60 ton ditambah berat alat berat itu sendiri agar mampu menekan hingga beban tekan sebesar 60 ton. Konfigurasi pengujian beban statis dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Persiapan Instalasi Alat Berat di Dekat Benda Uji Prototipe KSSL

Sifat-sifat fisis dan mekanis tanah dapat dijelaskan dan dipelajari dari hasil uji laboratorium pada beberapa sampel tanah yang diambil dari uji bor. Hasil pengujian yang diperoleh tersebut bisa digunakan untuk menghitung tujuan dari pengujian tersebut, misal kuat dukung dan atau penurunan yang terjadi.

Pengujian tanah di lapangan untuk kebutuhan rekayasa geoteknik menjadi penting khususnya apabila pengambilan contoh tanah sangat mudah sekali terganggu untuk jenis tanah tertentu. Adapun hasil ke dua uji Sondir dan Bor Dalam (SPT), masing-masing dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 berikut ini.



(a). Sondir 1 (b). Sondir 2

Gambar 3. Grafik Sondir

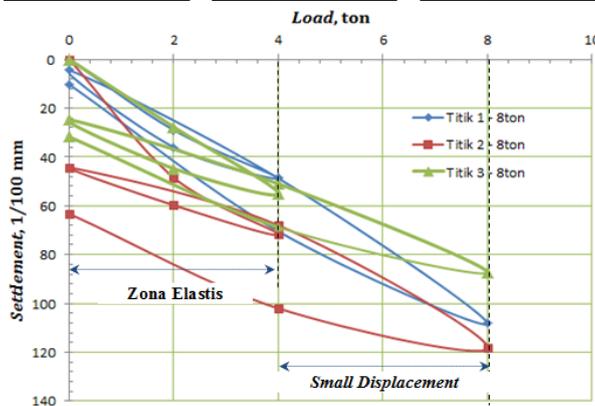
Depth (m)	Log Bor	Standard Penetration Test (SPT)		Deskripsi	Warna	
		N / 30 cm				
0		0	0	Urucan Sirtu	Coklat	
1				Lempung-kelanauan	Abu-abu	
2		3	3			
3		6	6			
4		6	6			
5		2	2			
6		3	3			
7		5	5			
8		7	7			
9						Abu-abu Hitam
10						
11						
12						
13						
14						
15						

Gambar 4. Borlog B1

Hasil pengujian beban siklis hingga 8 ton terhadap penurunan untuk titik 1, 2, dan 3 dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 5 berikut ini.

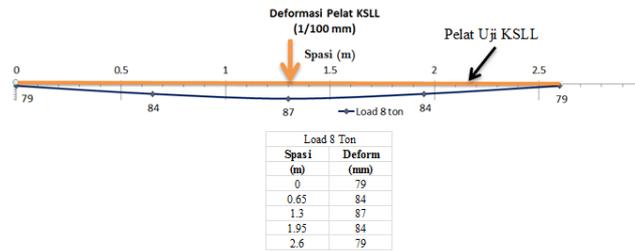
Tabel 3. Hasil Pembebanan Siklis Hingga 8 ton Pada Titik No. : 1, 2, 3

Titik 1		Titik 2		Titik 3	
Load (ton)	Accumulative Settlement (1/100 mm)	Load (ton)	Accumulative Settlement (1/100 mm)	Load (ton)	Accumulative Settlement (1/100 mm)
0	0	0	0	0	0
2	29	2	49	2	28
4	49	4	72	4	55
2	36	2	60	2	45
0	5	0	44	0	25
4	49	4	68	4	51
8	108	8	118	8	87
4	71	4	102	4	69
0	10	0	63	0	32



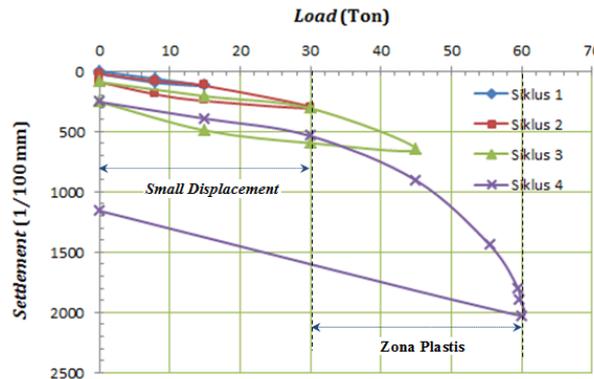
Gambar 5. Uji Beban Statis Siklis Hingga 8 Ton

Sedangkan penurunan pelat yang terjadi pada titik 3 dengan beban 8 ton dapat dilihat pada Gambar 6.



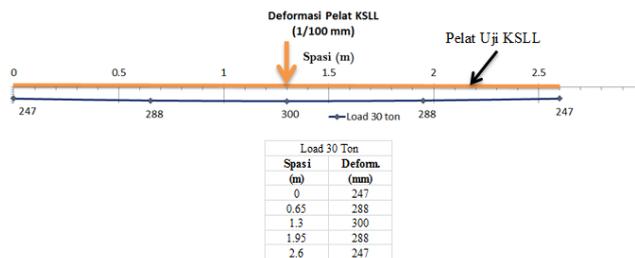
Gambar 6. Deformasi Pelat KSSL di Titik 3 (8 Ton)

Sedangkan hasil pengujian beban terhadap penurunan yang terjadi di titik No. 4 dapat dilihat pada Gambar 7:



Gambar 7. Uji Beban Statis Hingga *Failure* - 60 Ton

Selanjutnya penurunan pelat yang terjadi pada titik 3 dengan beban 30 ton dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Deformasi Pelat KSSL di Titik 3 (30 Ton)

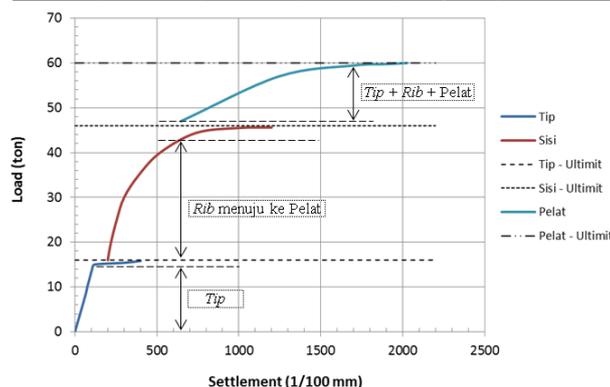
HASIL PENELITIAN

Pengamatan penurunan yang terjadi akibat pertambahan beban juga *unloading*-nya sebesar 8 ton, 15 ton, 30 ton, 45 ton, dan 60 ton. Pada saat pemberian beban hingga 8 ton, deformasi tetap yang terjadi pada titik-titik: 1, 2, dan 3 masing-masing sebesar 10/100 mm; 63/100 mm dan 32/100 mm seperti terlihat pada Gambar 3-8. Adanya deformasi tetap saat dilakukan *unloading* menunjukkan tanah sudah berperilaku plastis meskipun deformasi tetap tersebut masih di bawah 5% lebar *rib* (ICE, 2012) artinya kuat dukung pada ujung (*tip*) *rib* belum termobilisir penuh atau dalam kriteria *small displacement*. Sedangkan pada beban 4 ton di semua titik uji 1, 2, dan 3, deformasi *unloading* yang terjadi masing-masing sebesar 5/100 mm; 44/100 mm dan 25/100 mm, bisa dikatakan masih pada batas elastis. Pembebanan selanjutnya dilaksanakan 4 siklus (*cycle*) pada titik 4, yakni beban siklus masing-masing sebesar 15 ton, 30 ton, 45 ton, dan 60 ton. Pembebanan pada siklus 1, 2, 3, dan 4 menghasilkan penurunan permanen *unloading* sebesar 21/100 mm, 88/100 mm, 254/100 mm, dan 2029/100 mm seperti pada Gambar 3-10. Hasil penurunan terhadap pembebanan di atas menghasilkan kondisi bahwa hingga beban 45 ton, deformasi yang terjadi (2,54 mm) masih dalam zona *small displacement*, sedangkan pada pembebanan antara 45-60 ton deformasi yang terjadi sudah bersifat plastis. Pada beban siklus 60 ton penurunan terus terjadi sehingga

kurva beban versus penurunan sudah asimtotis. Hasil beban siklis ini akan sangat bermanfaat untuk perhitungan kuat dukung fondasi. Mekanisme Transfer Beban (MTB) sangat diperlukan untuk mengungkapkan sebaran tegangan yang terjadi dari beban kerja yang bekerja pada KSSL ke tanah di bawahnya. Untuk KSSL transfer beban yang terjadi adalah dari pelat ke *rib* kemudian diteruskan ke ujung *rib*. Selanjutnya pelat KSSL menyebarkan ke tanah pengisi dan diteruskan ke tanah di bawahnya. MTB ini dapat diduga dari hasil pengujian beban statis skala penuh antara beban *versus* penurunan. Pada Gambar 3-8 dan Tabel 3-1, saat beban diberikan 4 ton dan dilakukan *unloading* di semua titik uji (T1, T2, T3) dapat dikatakan kembali ke titik semula sehingga pada beban tersebut deformasi yang terjadi pada kondisi elastis. Sedangkan saat beban diberikan hingga 8 ton di semua titik uji (T1, T2, T3) terjadi deformasi tetap yang masih per seratus milimeter sehingga kondisi ini dikatakan zona *small displacement*. Sedangkan Pada Gambar 3-10, deformasi sebesar 2,5 mm terjadi pada saat *unloading* beban 45 ton. Sedangkan pada beban 60 ton, terjadi *failure* yang tanpa ada penambahan beban deformasi terus terjadi sehingga kurva beban versus penurunan berbentuk hiperbolis. Hasil uji skala penuh adalah sebagai kalibrasi terhadap perhitungan teori/numerik kuat dukung tanah, oleh karenanya perlu dilakukan analisis balik hasil uji lapangan terhadap perhitungan numerik. KSSL memiliki struktur *rib* konstruksi, *rib settlement*, dan pelat lantai. Pemetaan MTB menggunakan rasio daya dukung tanah ultimit KSSL (*Rib* dan Pelat) terhadap beban uji yang selanjutnya disebut *Load-Ultimate Ratio Factor (L-URF)*. Hasil perhitungan *L-URF* dapat dilihat pada Tabel 4-1 dan Gambar 4.

Tabel 4. Rasio Daya Dukung Ultimit Tanah Terhadap Beban Uji ($N_{SPT} = 3$)

Load (Ton)	Load-Ultimate Ratio Factor (L-URF)				
	Rib			Pelat	Rib + Pelat
	R_{Tip}	R_{Sisi}	R_{Total}		
8	2,02 (16,19/8)	3,75 (29,98/8)	5,77 (46,17/8)	6,99 (55,94/8)	12,76 (102,10/8)
Keterangan:	Hampir seluruh beban termobilisasi di <i>tip</i>	Sisi sudah mulai termobilisasi	---	---	---
15	1,08	2,00 (29,98/15)	3,08	3,73	6,81
Keterangan:	Seluruh beban termobilisasi di <i>tip</i>	Hampir seluruh beban termobilisasi di sisi	---	Pelat sudah mulai termobilisasi	---
30	0,54	1,00	1,54	1,86	3,40 (102,10/30)
Keterangan:	Seluruh beban termobilisasi di <i>tip</i>	Seluruh beban termobilisasi di sisi	---	Hampir seluruh beban termobilisasi di pelat	Rib + pelat sudah mulai termobilisasi



Gambar 9. Idealisasi Mekanisme Transfer Beban (MTB) dari Hasil Uji Beban Statis dan Analisis Balik.

Tabel 4 dan Gambar 9 menjelaskan bahwa ketika beban diberikan 8 ton maka seluruh beban dipikul oleh kuat dukung R_{Tip} karena rasio yang terjadi $2,02 > 1,71$. Sedangkan pada beban 15 ton maka seluruh beban dipikul oleh kuat dukung R_{Tip} dan sebagian R_{Sisi} . Selanjutnya pada beban 30 ton maka kuat dukung tanah di bawah pelat sudah mulai bekerja karena rasio pada R_{Total} adalah $1,54 < 1,71$. Analisis dapat dikembangkan terhadap variasi dimensi *rib* kon-

struksi maupun *rib settlement*, yakni tinggi *rib* dan tebal *rib*. Untuk mengetahui apakah ada peningkatan atau penurunan kuat dukung ultimit KSSL maka dilakukan perhitungan $Q_{Ultimit}$ KSSL terhadap variasi tinggi *Rib* Konstruksi ($H_{Rib-Konstruksi}$) yakni $H_{Rib-Konstruksi} = 0,5$ s/d $0,7$ m dan juga terhadap variasi tebal *rib*. Analisis ini diperlukan untuk menjawab apakah kuat dukung ultimit KSSL dipengaruhi oleh kedua dimensi yakni tinggi dan tebal *rib*.

Perhitungan balik dengan metode elemen hingga, menggunakan program SAP 3D dan PLAXIS 2D. Adapun parameter tanah yang digunakan seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Tanah

Parameter	Name	Lempung Lunak	Lempung Lunak-Medium	Unit
Material model	Model	HSM	HSM	-
Type of material behaviour	Type	UnDrained	UnDrained	-
Dry soil weight	γ_{dry}	11	12,50	kN/m ³
Wet soil weight	γ_{wet}	17	17,50	kN/m ³
Permeability in horizontal direction	k_x	0,0001	0,0001	m/day
Permeability in vertical direction	k_y	0,0001	0,0001	m/day
Cohesion (constant)	c_{ref}	26,0 – 35,0	27	kN/m ²
Friction angle	ϕ	35	14	°
Dilatancy angle	ψ	0,0	0,0	°
Young's modulus (ref-50)	E_{50}^{ref}	7500 - 10500	25000	kN/m ²
Young's modulus (ref-oed)	E_{oed}^{ref}	7500 - 10500	25000	kN/m ²
Young's modulus (ref-ur)	E_{ur}^{ref}	22500	75000	kN/m ²
Power	m	0,5	0,5	
Poisson Ratio (ν_r)	ν_{ur}	0,2	0,3	
Reference Stress	p_{ref}	100	100	kN/m ²
Strength reduction factor inter.	R_{int}	0,7	0,7	-
Interface permeability	Perm	Imperm.	Imperm.	-

Oleh karena dari hasil uji lapangan pada beban hingga 30 ton masih pada kondisi *small displacement* (< 5 mm, 5% tebal *rib*) maka pemodelan 3D dapat menggunakan program SAP 3D. Hasil perhitungan balik *Displacement – Stress* model struktur prototipe KSSL dapat ditabelkan sebagai Tabel 6:

Tabel 6. Load versus Displacement

Load (ton)	Displacement (1/100 mm)			
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4
8	68,3	68,5	75,2	75,2
15	-	-	-	119,3
30	-	-	-	213,7

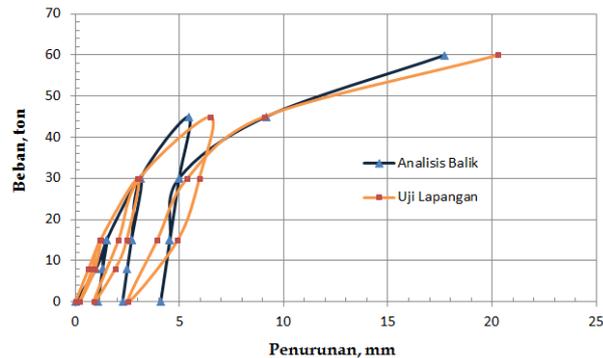
Pada Tabel 6, uji SLT pada beban 15 ton dan 30 ton dilaksanakan hanya pada Titik 4 saja. Adapun perbandingan antara hasil uji lapangan SLT dan analisis balik numerik terhadap Beban versus Penurunan di Titik 4 dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Uji dan Numerik Untuk Beban versus Penurunan

Beban (ton)	SAP 3D (mm)	Plaxis 2D (mm)	SLT (mm)	Keterangan
8	0,75	0,99	0,63	<i>Small displacement</i>
15	1,19	1,5	1,20	
30	2,14	3,13	3,00	

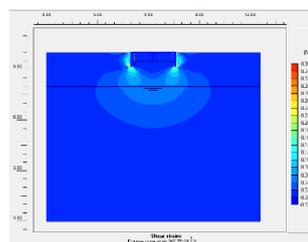
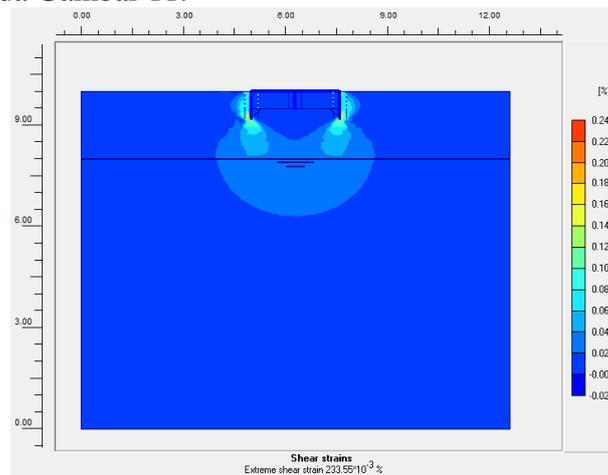
Pada beban 30 ton terjadi perbedaan antara hasil SLT dan model numerik program SAP 3D disebabkan setiap beban siklis dilaksanakan (uji lapangan/SLT) sudah terjadi deformasi/penurunan tetap sehingga siklis berikutnya terjadi penambahan deformasi. Sedangkan tegangan-tegangan yang terjadi pada *rib* dan pelat dengan pemodelan program SAP 3D menghasilkan tegangan-tegangan yang jauh lebih kecil dari mutu beton (25 MPa), artinya perubahan dimensi dan mutu beton bisa dilakukan penyesuaian.

Perbandingan antara Beban terhadap Penurunan (deformasi) dari hasil SLT dan model numerik dapat dilihat pada Gambar 4-2.

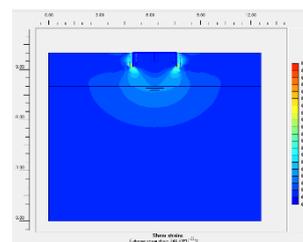


Gambar 10. Perbandingan Antara Hasil Uji SLT (*Loading – Unloading*) dan Model Numerik Untuk Beban *versus* Penurunan

Dari Gambar 10 menunjukkan bahwa pada beban *loading-unloading* hingga 30 ton hasil penurunan yang terjadi baik saat *loading* maupun *unloading* adalah hampir sama hanya saja deformasi tetap ketika *unloading* pada beban 30 ton terjadi perbedaan. Hasil uji lapangan SLT deformasi *unloading* sebesar 0,9 mm sedangkan hasil numerik 2,3 mm. Sedangkan Gambar 4-3 menggambarkan perbandingan antara hasil uji SLT dan pemodelan numerik untuk beban *loading versus* penurunan. *Shear strain* yang terjadi pada beban 8 ton, 15 ton, dan 30 ton dapat dilihat pada Gambar 11.



Shear Strain 0,349%
(15 ton)



Shear Strain 0,744%
(30 ton)

Gambar 11. *Shear Strain* 0,233% Pada Beban 8 ton PLAXIS 2D

Kondisi ini menggambarkan situasi kuat dukung tanah pada ujung *Rib* Konstruksi telah mengalami kondisi plastis.

KESIMPULAN

- 1) Penelitian ini mampu dan berhasil memodelkan serta mengungkapkan mekanisme transfer beban. Inisiasi penambahan beban diteruskan ke tanah melalui ujung *rib* (Rib_{Tip}), selanjutnya bila telah terakomodasi kemampuan kuat dukung tanah di bawah Rib_{Tip} maka kuat dukung tanah diteruskan ke sisi *rib* (Rib_{Sisi}) kemudian dengan cara yang sama beban akan diteruskan ke bawah pelat. Saat penambahan beban ditingkatkan hingga tegangan-deformasi tanah menuju plastis maka seluruh beban akan dipikul oleh sistem KSSL dan tanah pengisinya menekan lapisan tanah di bawahnya. Ini berlaku untuk kondisi titik beban berada di atas *rib* maupun di tengah area berbatasan dengan *rib*.
- 2) Seperti yang diduga oleh Pane (2011) membuktikan jika tanah pengisi ada jarak atau *gap* dengan sisi bawah pelat maka mekanisme transfer beban dari pelat ke tanah pengisi tidak pernah terjadi untuk beban < 15 ton.
- 3) Perbandingan hasil uji skala penuh di lapangan dan hasil uji numerik untuk penambahan beban 8 ton memberikan hasil uji lapangan sebesar 0,63 mm sedangkan hasil numerik 2D dan 3D masing-masing sebesar 0,99 mm dan 0,75 mm. Pada beban 15 ton memberikan hasil uji lapangan sebesar 1,20 mm sedangkan hasil numerik 2D dan 3D masing-masing sebesar 1,5 mm dan 1,19 mm. Oleh karenanya penambahan beban yang menimbulkan batas *small displacement* $< 2,5$ mm adalah beban 8 ton dan 15 ton. Sedangkan pada beban 30 ton memberikan hasil uji lapangan sebesar 3,00 mm sedangkan hasil numerik 2D dan 3D masing-masing sebesar 3,13 mm dan 2,14 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J. B., Townsend, F. C., Rahelison, L., (2007). “*Load Testing and Settlement Prediction of Shallow Foundation*”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1978). “*Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*”, 12th Edition, Washington DC.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards, (1989). “*Annual Book-Volume 04.08: Soil and Rock, Stones, Geotextiles*”, Philadelphia, PA 19103-1187 USA.
- Bowles, J. E., (1988). “*Foundation Analysis and Design*”, McGraw-Hill Book Company Co.-Singapore.
- Coduto, D. P. (1994). “*Foundation and Design – Principles and Practices*”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- D’Appolonia, D. J., D’Appolonia, E. D., and Brissette, R. F., (1970). “*Closure: Settlement of Spread Footings on Sand*”, Journal Soil Mech. and Found. Div., 96(2), 754 –762.
- Das, B. M., (2004). “*Principles of Foundation Engineering*”. 5th Edition, Brooks/Cole, US.
- Djajaputra, A., Sofwan, A., Rahardian, H., Pane, I., Taufik, R., Rukmono, A., (2009). “*Aplikasi Teknologi Konstruksi sarang Laba-Laba (KSSL) Untuk Lapangan Terbang (Runway, Taxiway, I), Container Yard*”, Penelitian Hibah - Program Insentif Peningkatan Kapasitas IPTEK Sistem Produksi.
- Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., dan Adi, A. D., (2000). “*Perilaku Sistem Fondasi Cakar Ayam Kontribusi untuk Perancangan*”, Laporan Penelitian Hibah Bersaing Perguruan Tinggi, Tahun Anggaran 1998/1999 dan 1999/2000, Lembaga Penelitian Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., dan Mitrabani, (2009). “*Perilaku Sistem Fondasi Cakar Ayam Pada Tanah Ekspansif*”, Laporan Penelitian Program Intensif Peningkatan Sistem Produksi, Tahun Anggaran 1998/1999 dan 1999/2000, Lembaga Penelitian Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

- Hardiyatmo, H. C., (2010). "Perancangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi Untuk Perkerasan Jalan Raya", Cetakan Pertama, Penerbit Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Institution of Civil Engineers, (2012). "ICE Manual of Geotechnical Engineering, Volume II", ICE Publishing, London, UK, page 816.
- Jaky, J., (1944). "The Coefficient of Earth Pressure at Rest", J. Soc. Hungarian Arch. Eng. pp. 355-358.
- Janbu, N. (1963). "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests", Proc. Euro. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wissbaden, Germany, Vol 1, 19- 25.
- Pane, I., (2011). "Applications Of Ribbed Plate Construction For Airport And Highway Pavement," Faculty of Civil and Environmental Engineering, ITB.
- Plaxis 2D, (2010). "Manual", ISBN – 13: 978-90-760 16-08-05
- Sengara, IW., AA. Djajaputra, BM. Hutapea, Roesyanto, F. Jieprang, R. Widiadi, Aswandi (2001). "Experimental and Finite Element Studies of Load Transfer Mechanism at Piled Raft Foundation System", Research Report-Graduate Grant Batch IV, 1999-2000, Directorate General of Higher Education.
- Srilakshmi G., Rekha, B., (2011). "Analysis of MAT Foundation using Finite Element Method", International Journal of Earth Sciences and Engineering ISSN 0974-5904, Volume 04, No 06 SPL, pp. 113-115.
- Suhendro, B., (1992)." Laporan Kemajuan ke III, Studi Optimalisasi Formula Cakar Ayam", Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suhendro, B., (2005). "Sistem Cakar Ayam Modifikasi Sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di atas Tanah Lunak", Jakarta : Buku 60 tahun Departemen Pekerjaan Umum.
- Terzaghi, K., dan Peck, R. B. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice", Wiley, New York.
- Veermer, P.A., De Borst, R., (1984). "Non-Associated Plasticity for Soils", Concrete and Rock, Heron, Vol 29, No. 3.