

METODA HITUNGAN LENDUTAN PELAT DENGAN MENGGUNAKAN MODULUS REAKSI TANAH DASAR EKIVALEN UNTUK STRUKTUR PELAT FLEKSIBEL

Calculation Method Of Slab Deflection Using An Equivalent Modulus Of Subgrade Reaction For Flexible Slab Structures

Hary Christady Hardiyatmo

Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Jl. Grafika no.2 Yogyakarta.

Email: harychristady@ yahoo.com

ABSTRACT

To evaluate deflection of a slab using theory of beam on elastic foundation needs a value of vertical modulus subgrade reaction (k). This k values are usually obtained by conducting plate load test using rigid plate with 30 cm or 76 cm in diameters. For a larger concrete slab, the determination of coefficient of vertical modulus subgrade reaction to evaluate the performance of concrete slab (rigid pavement) need to be examined. A study of the behavior of concrete slab under loading has been carried out at the Soil Mechanics Laboratory Civil Engineering Department Gadjah Mada University. Flexible thin reinforced concrete slabs having a dimension of 3m x 1m x 0,1m, supported by 12 piles have been subjected to point loads at several points. Deflections on the slab were observed and compared with those calculated using the theory of beam on elastic foundation involving determination the coefficient of modulus of subgrade reaction (k). Results of this study showed that the adopted method may be used to evaluate the performance of the concrete slab (rigid pavement) and gave satisfactory prediction of the concrete slab deflection under a point load.

Keywords: concrete slab, modulus of subgrade reaction, average deflection.

PENDAHULUAN

Dalam pembangunan perkerasan kaku yang melebar, contohnya sistem perkerasan beton bertulang kontinu, sistem Cakar Ayam dan sistem Pelat Terpaku (*nailed slab*) (Hardiyatmo, 2008), maka diperlukan evaluasi kinerjanya setelah struktur tersebut dibangun. Bila suatu pelat terletak di atas tanah, kekuatannya akan bergantung pada kekuatan pelatnya sendiri, kapasitas dukung tanah dasar dan interaksi antara pelat dan tanah dasar dalam mendukung beban, yang umumnya dipengaruhi oleh adanya rongga-rongga yang terbentuk di antara keduanya. Rongga-rongga antara pelat ini dapat disebabkan oleh penurunan tak seragam antara pelat dan tanah dasar, maupun oleh proses pemompaan butiran halus (*pumping*) ke permukaan pelat akibat beban yang bekerja.

Untuk mengevaluasi kinerja sistem ini, maka dapat dilakukan uji beban pelat di atasnya, guna mengetahui hubungan beban dan lendutan yang nantinya dinyatakan dalam istilah modulus reaksi tanah dasar (*modullus of subgrade reaction, k*).

Pengujian pelat beton yang didukung kelompok tiang dengan *pile cap* tipis telah dilakukan oleh Hardiyatmo dan Suhendro (2003) dan Destika (2005). Analisis hasil uji terutama ditujukan untuk mempelajari perilaku pelat yang didukung tiang-tiang sebagai fondasi bangunan.

Penentuan modulus reaksi tanah-dasar (*subgrade*), umumnya dilakukan dengan melakukan uji beban pelat (*plate load test*), yaitu dengan cara membebani secara sentris pelat baja berbentuk lingkaran yang sangat kaku berdiameter antara 30 sampai 76 cm. Hasil uji tersebut digunakan untuk menentukan tebal perkerasan atau pelat beton yang terletak pada tanah-dasar dari bahan tertentu.

Dalam tinjauan pelat beton untuk perkerasan kaku, pelat tersebut umumnya akan berperilaku sebagai struktur fleksibel, karena tebalnya relatif tipis dibandingkan dengan lebarnya. Untuk menghitung lendutan dengan menggunakan teori balok pada fondasi elastik (*Beam on Elastic Foundation, BoEF*) (Hetenyi, 1974), maka diperlukan nilai modulus reaksi tanah dasar (k) untuk pelat fleksibel. Penentuan k untuk pelat fleksibel ini diperoleh dari hubungan tekanan dan lendutan dengan lendutan yang merupakan lendutan rerata di sepanjang pelat. Bila pelat didukung oleh kelompok tiang, maka lendutan akibat beban akan tereduksi oleh adanya tiang tersebut. Karena itu dalam analisis lendutan perlu digunakan nilai k ekuivalen yang memperhitungkan pengaruh kelompok tiang.

Modulus Reaksi Tanah Dasar

Modulus reaksi tanah-dasar didefinisikan sebagai rasio antara tekanan (q) pada suatu pelat kaku terhadap lendutan, yaitu:

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

dengan:

$q = Q/A =$ tekanan pada pelat (kN/m^2)
 $Q =$ beban titik (kN)
 $A =$ luas pelat beban (m^2)

Untuk suatu pelat yang relatif tipis, sehingga pelat akan berperilaku sebagai pelat fleksibel Hardiyatmo et al. (1999) menyarankan persamaan modulus reaksi tanah dasar:

$$k = \frac{q}{\delta_a} \quad (2)$$

dengan:

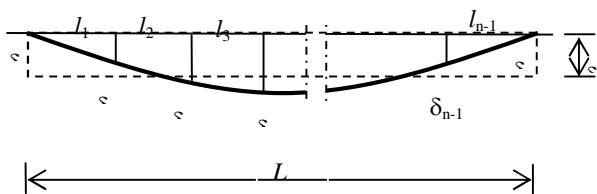
$q = Q/A_c =$ tekanan pada pelat (kN/m^2)
 $Q =$ beban titik (kN)
 $A_c =$ luas pelat beban (m^2)

Lendutan rerata (δ_a) dihitung dengan menggunakan persamaan (lihat Gambar 1):

$$\delta_a = \frac{1}{2L} \{l_1(\delta_i + \delta_{i+1}) + l_{i+1}(\delta_{i+1} + \delta_{i+2}) + \dots + l_{n-1}(\delta_{n-1} + \delta_n)\} \quad (3)$$

dengan:

$\delta_a =$ lendutan rerata pelat fleksibel (m)
 $\delta_i =$ lendutan di titik ke- i dari pelat fleksibel (m)
 $i =$ nomor titik pengukuran 1 sampai n
 $l_i =$ jarak masing-masing titik (m)
 $L =$ panjang pelat yang menyentuh tanah (m).



Gambar 1. Penentuan lendutan rerata (δ_a) untuk pelat fleksibel (Hardiyatmo et al., 1999)

Tegangan rerata dihitung dengan memperhitungkan luas kontak pelat dengan tanah. Persamaan (2) mirip dengan Persamaan (1), perbedaannya hanya pada hitungan tekanan (q) yang

ditentukan berdasarkan luas kontak efektif antara pelat dan tanah, dan lendutan ditentukan berdasar lendutan rerata pada pelat.

Untuk pelat beban dengan ukuran tertentu, modulus reaksi tanah-dasar dinyatakan oleh persamaan (Terzaghi, 1955 dalam Teng, 1981):

$$k_f = k_1 \frac{B_1}{B_f} \quad (4)$$

dengan $k_f =$ modulus reaksi tanah dasar pada pelat dengan lebar B_f dan $k_1 =$ modulus reaksi tanah dasar dari hasil uji beban pelat selebar B_1 .

Hitungan Lendutan

Perilaku lendutan balok pada fondasi elastis tergantung dari nilai fleksibilitas balok (λ) yang menurut Hetenyi (1974):

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}} \quad (5)$$

dengan:

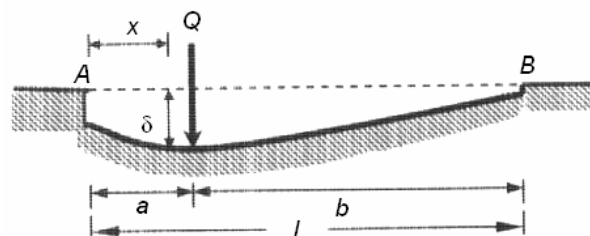
$\lambda =$ fleksibilitas balok di atas tanah (m^{-1})
 $E =$ modulus elastisitas balok (kN/m^2)
 $I =$ momen inersia balok (m^4)
 $B =$ lebar balok (m)

Untuk menghitung lendutan pelat dengan panjang terbatas yang dibebani beban terpusat di sembarang titik (Gambar 2), digunakan persamaan dari teori balok pada fondasi elastik (Hetenyi, 1974):

$$\delta = \frac{Q\lambda}{k} \frac{1}{\sinh^2 \lambda l - \sin^2 \lambda l} \{2 \cosh \lambda x \cos \lambda x (\sinh \lambda l \cos \lambda a \cosh \lambda b - \sin \lambda l \cosh \lambda a \cos \lambda b) + (\cosh \lambda x \sin \lambda x + \sinh \lambda x \cos \lambda x) [\sinh \lambda l (\sin \lambda a \cosh \lambda b - \cos \lambda a \sinh \lambda b) + \sin \lambda l (\sinh \lambda a \cos \lambda b - \cosh \lambda a \sin \lambda b)]\} \quad (6)$$

dengan:

$a, b =$ jarak-jarak yang ditunjukkan dalam Gambar 2
 $Q =$ beban titik
 $l =$ panjang balok

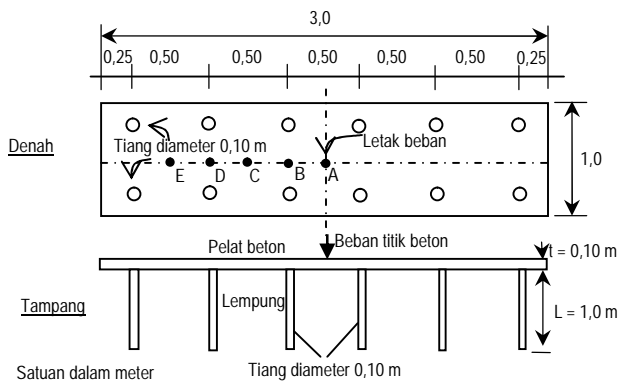


Gambar 2. Hitungan lendutan akibat beban titik (Hetenyi, 1974)

Uji Beban pada Pelat Beton

Untuk mengkaji apakah persamaan lendutan yang didasarkan pada teori balok pada fondasi elastik cukup baik untuk mengevaluasi kinerja pelat beton yang relatif tipis, maka dilakukan uji beban pada pelat beton bertulang ukuran 1 m x 1 m dan 3 m x 1 m. Di bawah pelat yang berukuran 3 m x 1 m, didukung oleh 12 tiang yang dipasang monolit terhadap pelat. Pengujian ini merupakan salah satu bagian dari penelitian untuk mengkaji perilaku sistem "pelat terpaku" (*nailed slab*) akibat pembebanan.

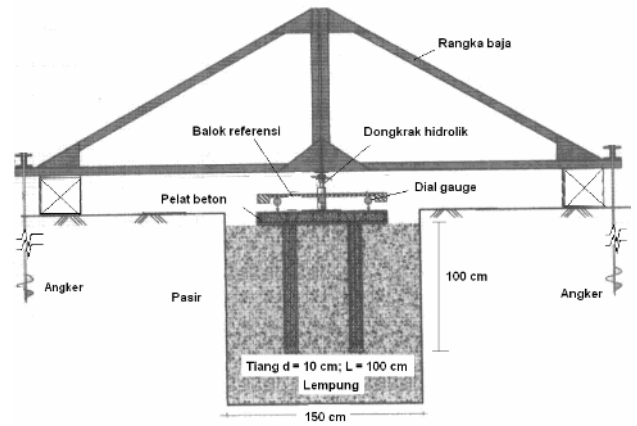
Uji beban pada pelat beton bertulang, dilakukan pada pelat beton bertulang yang didukung 12 tiang diletakkan pada tanah dasar lempung. Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Tanah dasar digunakan lempung yang berasal dari Kedung Sari Wates DIY, dengan berat jenis (G_s) = 2,56, kadar air rerata (w) = 60%, derajat kejenuhan (S) 99,6%, LL = 86%, PL = 31% dan PI = 55%. Uji beban pelat dilakukan pada pelat beton ukuran 1 m x 1 m x 0,1 m (panjang x lebar x tebal) tanpa didukung tiang dan pelat beton bertulang 3 m x 1 m x 0,1 m. Kuat tekan beton (f_c') = 22 MPa, modulus elastisitas (E) = $1,5 \times 10^7$ kN/m². Tiang berbentuk bulat diameter 10 cm dan panjang 100 cm. Untuk pelat 1 m x 1 m x 0,1 m uji beban dilakukan secara sentris, sedang untuk pelat beton 3 m x 1 m x 0,1 m, uji beban dilakukan pada beberapa titik dalam arah memanjang pelat (Gambar 3).



Gambar 3. Skema benda uji pelat beton didukung kelompok tiang

Beban diterapkan melalui dongkrak hidrolik yang ditahan oleh kuda-kuda rangka baja. Landasan beban yang dalam kontak dengan permukaan pelat beton berupa pelat baja kaku berdiameter 30 cm (setara dengan luas bidang kontak ban truk). Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan

interval 100 kg sampai mencapai sekitar 5 ton. Sejumlah arloji pengukur lendutan (*dial gauge*) diletakkan di 13 titik di atas pelat. Letak titik beban adalah di pusat pelat dan pada jarak-jarak 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 m dari pusat pelat atau pada titik-titik A, B, C, D, E (Gambar 3). *Set-up* uji beban pada pelat beton yang didukung tiang-tiang dilihat dalam Gambar 4.

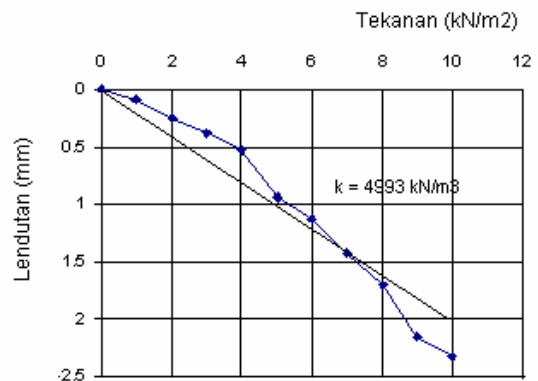


Gambar 4. *Set-up* uji beban pada pelat beton bertulang yang didukung 12 tiang

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji beban pada pelat 1 m x 1 m

Pengujian dilakukan pada pelat beton bertulang 1 m x 1 m x 0,1 m tanpa tiang yang dibebani secara sentris. Dari hasil uji beban diperoleh modulus reaksi tanah dasar pada beban 7,74 kN atau tekanan 7,74 kN/m² (luas pelat 1 m²) adalah $k = 4993$ kN/m³ (modulus sekan) (Gambar 5).



Gambar 5. Hasil uji beban pada pelat 1 m x 1 m x 0,1 m

Hasil uji beban pada pelat 3 m x 1 m

Hasil uji pada pelat beton 3 m x 1 m x 0,1 m (panjang x lebar x tebal) untuk pembebanan di titik-titik A sampai E ditunjukkan dalam Gambar-gambar 6 sampai 10. Dalam gambar-gambar ini ditunjukkan

pula hasil hitungan lendutan dengan teori balok pada fondasi elastis (BoEF), yaitu dengan menggunakan Persamaan (6).

Hasil uji memperlihatkan bahwa pelat beton bertulang 3 m x 1m x 0,1m ketika dibebani mengalami lendutan yang bervariasi yang bergantung pada letak beban. Pada beban yang sama lendutan akan semakin besar bila beban terletak di pinggir. Dibandingkan dengan beban di pusat, selisih lendutan antara bagian pinggir (titik E) dan pusat (titik A) adalah sekitar 2,2 kalinya (Tabel 1). Hal ini menunjukkan bahwa kondisi kritis pelat beton yang terletak di atas tanah-dasar elastis pada saat dibebani adalah bila beban bekerja semakin ke pinggir. Karena itu, dalam aplikasi perlu dipikirkan adanya penebalan di bagian ini.

Tabel 1. Perbandingan lendutan di bawah titik beban ($Q = 7,74$ kN)

Letak beban	Lendutan di bawah beban (mm)		Selisih (%)
	Pengamatan	Hitungan	
A	0,112	0,115	2,6
B	0,154	0,168	9,1
C	0,179	0,225	25,7
D	0,186	0,217	16,7
E	0,25	0,306	22,0

Penentuan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k') dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2) dan (3), yaitu dengan cara menghitung lendutan rerata (δ_a) di sepanjang pelat. Istilah modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k'), digunakan untuk membedakan modulus reaksi tanah dasar klasik (yaitu dari uji beban pelat standar) dan modulus tanah dasar pelat yang sudah dipengaruhi oleh dimensi pelat yang lebih lebar dan perlawanan kelompok tiang yang mendukung pelat.

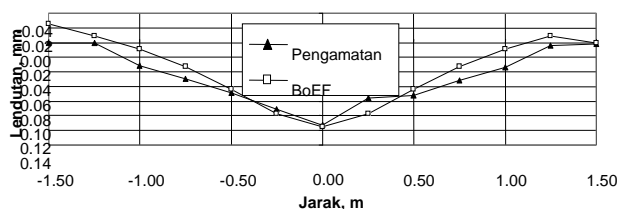
Dalam menghitung tekanan pelat ke tanah (tekanan kontak), bidang kontak (A_c) adalah luas bidang kontak antara pelat dan tanah. Jadi, jika sebagian pelat terangkat akibat pembebanan (biasanya di bagian pinggir kanan-kiri), maka luas pelat efektif (A_c) yang diperhitungkan untuk menentukan tekanan rerata adalah dari bagian dasar pelat yang dalam kontak dengan tanah saja.

Dari nilai lendutan dalam Tabel 1, dapat ditentukan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k') dengan menggunakan Persamaan (2), hasilnya ditunjukkan dalam Tabel 2.

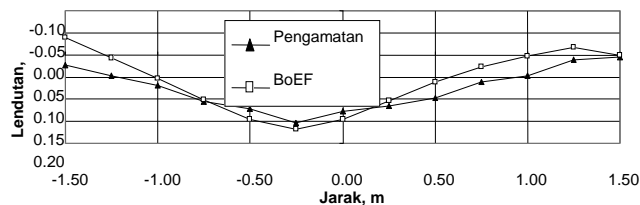
Tabel 2. Hasil hitungan lendutan rerata ($Q = 7,74$ kN)

Letak beban	Lendutan rerata, δ_a (mm)	Modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k')
A	0,055	64853
B	0,081	40294
C	0,101	34323
D	0,091	43014
E	0,132	37204

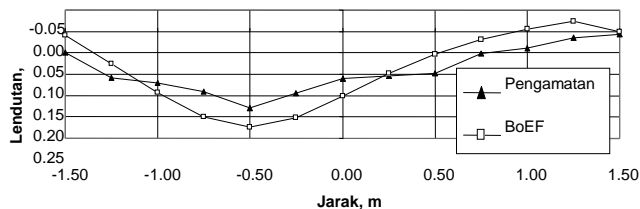
Nilai-nilai modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k') yang diperoleh, kemudian digunakan untuk menghitung lendutan (\square) di sepanjang pelat dengan menggunakan Persamaan (6). Hasilnya digambarkan sekaligus dengan hasil pengamatan, seperti ditunjukkan dalam Gambar-gambar 6 sampai 10.



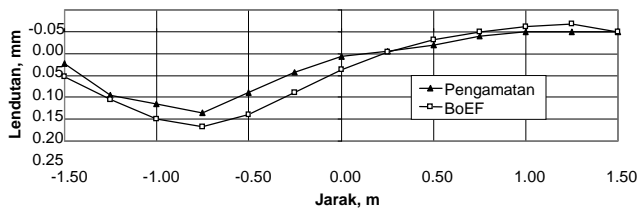
Gambar 6. Perbandingan lendutan hasil pengamatan dan hitungan untuk beban di A ($Q = 7,74$ kN)



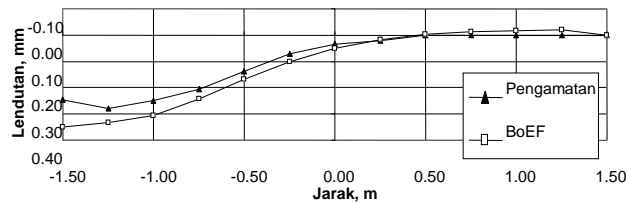
Gambar 7. Perbandingan lendutan hasil pengamatan dan hitungan untuk beban di B ($Q = 7,74$ kN)



Gambar 8. Lendutan hasil pengamatan dan hitungan untuk beban di C ($Q = 7,74$ kN)



Gambar 9. Perbandingan lendutan hasil pengamatan dan hitungan untuk beban di D ($Q = 7,74$ kN)



Gambar 10. Perbandingan lendutan hasil pengamatan dan hitungan untuk beban di E ($Q = 7,74$ kN)

PEMBAHASAN

Dari seluruh hasil uji dalam Gambar-gambar 6 sampai 10, terlihat bahwa alur kurva dari grafik hasil hitungan lendutan dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k') cukup mendekati hasil pengamatan. Hal ini menunjukkan persamaan-persamaan dalam metoda balok pada fondasi elastis (BoEF), walaupun persamaan-persamaannya digunakan untuk hitungan struktur balok, namun ternyata juga cukup baik digunakan untuk memprediksi perilaku lendutan pelat beton fleksibel.

Perbedaan antara nilai lendutan dari hasil hitungan dan pengamatan relatif tidak terlalu jauh, hanya 2,6% untuk beban di pusat pelat dan 25,7% untuk beban di titik C. Hasil hitungan cenderung sedikit lebih besar dari hasil pengamatan. Hal ini juga menunjukkan bahwa hitungan modulus reaksi tanah dasar dengan berdasarkan nilai lendutan rerata cukup baik digunakan untuk analisis lendutan.

Persamaan (4) menunjukkan bahwa jika pelat yang lebih lebar akan menghasilkan k yang lebih kecil. Hal ini, karena pada beban terbagi rata yang sama, pelat yang lebih lebar area zona terkompresi lebih lebar dan dalam. Namun, dalam pengujian yang dilakukan, nilai k pada pelat uji 1 m x 1 m lebih kecil dari pelat 3 m x 1 m x 0,1 m. Hal ini, karena pelat 3 m x 1 m x 0,1 m didukung oleh 12 tiang, sehingga lebih banyak beban vertikal yang di lawan oleh reaksi vertikal dari tiang yang menghasilkan nilai k' yang lebih besar. Selain itu, ketika pelat melendut akibat

beban, tiang memberikan perlawanan momen yang mengurangi lendutan.

KESIMPULAN

1. Metoda penentuan nilai modulus reaksi tanah dasar dengan menggunakan hasil pengukuran lendutan rerata baik digunakan untuk pelat fleksibel.
2. Perbandingan hasil pengamatan dan hitungan dengan menggunakan teori balok pada fondasi elastis menunjukkan selisih lendutan yang berkisar antara 2,6 sampai 25%. Hasil ini menunjukkan bahwa teori tersebut, walaupun berlaku untuk balok, tapi cukup baik untuk mengevaluasi lendutan pelat fleksibel.
3. Kinerja pelat melebar yang berada di atas tanah dasar dapat dievaluasi dengan melakukan uji beban pelat dan menganalisis besarnya lendutan dari waktu ke waktu.
4. Metoda balok pada fondasi elastik (BoEF) cocok digunakan untuk memprediksi perilaku pelat fleksibel yang didukung kelompok tiang.

SARAN

1. Uji beban yang dilakukan adalah untuk pelat ukuran 1 m x 1 m x 0,1 m dan 3 m x 1 m x 0,1 m perlu dicoba untuk ukuran yang lebih uas.
2. Analisis lendutan pelat fleksibel yang memperlihatkan pengaruh kelompok tiang terhadap besarnya lendutan perlu dikaji lebih lanjut, karena hitungan lendutan yang dilakukan di atas adalah memperhatikan struktur pelat-tiang-tanah dasar yang bekerja menjadi satu kesatuan. Kajian lebih detail untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pemasangan tiang terhadap reduksi lendutan pelat perlu ditinjau dengan memperhatikan pengaruh-pengaruh reaksi kelompok tiang, ketika pelat dibebani.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya ditujukan kepada Kurniawan Destika dan Muhammad Firdaus, serta seluruh Staf Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM yang telah terlibat aktif dalam penelitian pelat beton tipis yang didukung kelompok tiang sebagai sistem "pelat terpaku" (*nailed slab*).

DAFTAR PUSTAKA

- Destika, K., 2005, Perilaku Pile Cap Beton Didukung Kelompok Tiang Pada Tanah Lempung Lunak Dengan Pembebanan Statis, *Thesis S-2*, Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- Hardiyatmo,H.C, Suhendro,B., Hutagamis sufardal, Susanto, H.A., 1999, Perilaku Fondasi Cakar Ayam pada Model di Laboratorium Kontribusi untuk Perancangan, *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik*, UGM, Yogyakarta.
- Hardiyatmo,H.C. dan Suhendro, B., 2003, Fondasi Tiang Dengan Pile Cap Tipis Sebagai Alternatif Untuk Mengatasi Problem Penurunan Bangunan Di Atas Tanah Lunak, *Laporan hasil Penelitian Hibah Bersaing IX Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 2001 - 2003*.
- Hardiyatmo, H.C., 2008, Sistem “Pelat Terpaku” (Nailed Slab) untuk Perkuatan Pelat Beton pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement), *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia*, MPSP-UGM, Yogyakarta.
- Hetenyi, M., 1974, *Beam on Elastic Foundation*, An Arbor: The University of Michigan Press, Michigan.
- Teng, W. C., 1981, *Foundation Design*, Prentice-Hall, of India, New Delhi.