

USULAN METODA PERHITUNGAN INTERAKTIF STRUKTUR PONDASI DI ATAS TANAH LUNAK DENGAN MENYERTAKAN PENGARUH PENURUNAN KONSOLIDASI JANGKA PANJANG.

Oleh
Yudhi Lastiasih *
Indrasurya B. Mochtar **

ABSTRAK

Perhitungan pondasi dangkal seperti pondasi pelat penuh (mat foundation), pondasi sarang laba-laba dan pondasi cakar ayam di atas tanah lunak belum ada yang memasukkan unsur penurunan konsolidasi tanah dasar dalam perhitungan. Umumnya dalam perhitungan yang ada, struktur atas dan bawah dianggap terpisah. Untuk memasukkan konsolidasi jangka panjang, masalahnya adalah gedung kaku menyebabkan penurunan yang relatif merata, padahal untuk penurunan konsolidasi yang merata dibutuhkan reaksi tanah yang tidak merata. Hal ini tidak dapat dipenuhi dalam sistem perhitungan terpisah seperti yang ada selama ini. Pada uraian ini diupayakan suatu metoda perhitungan struktur yang dapat mengalami penurunan secara merata selama konsolidasi tanah berlangsung, tanpa menyebabkan terjadinya kerusakan pada strukturnya. Perhitungan dilakukan dengan program khusus dengan asumsi reaksi tanah selalu menghasilkan penurunan yang merata. Dari metode ini diusulkan cara perhitungan interaksi tanah – gedung yang menyebabkan gedung dapat mengalami settlement tanpa rusak.

1. Latar Belakang

Gedung berlantai > 2 dibangun di atas tanah yang lunak jarang yang menggunakan pondasi dangkal, umumnya dengan pondasi tiang pancang. Kalau tanah lunak > 15 m , maka penggunaan tiang pancang akan menjadi mahal. Akan tetapi banyak perencanaan tetap enggan menggunakan jenis pondasi langsung yang lebih murah, karena dibanyak kasus telah terjadi banyak masalah kerusakan pada gedungnya akibat penurunan konsolidasi tanah dasar. Jadi meskipun mahal, pondasi tiang pancang tetap menjadi alternatif utama.

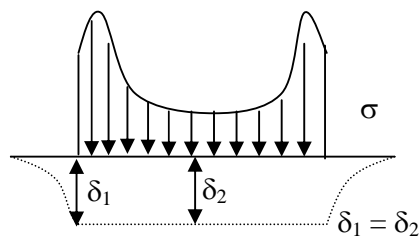
Pada perencanaan dengan pondasi langsung maupun tiang pancang, umumnya struktur yang direncanakan oleh para perencana dianggap ditumpu secara sempurna baik terjepit maupun tersendi. Anggapan ini menunjukkan bahwa struktur dianggap terpisah dengan pondasi (tanah), meskipun kenyataannya struktur dan pondasi (tanah) merupakan sebuah sistem struktur pondasi yang utuh yang tidak

terpisah.. Selain itu akibat beban struktur akan terjadi deformasi berupa penurunan pada tanah, dan penurunan ini akan mempengaruhi/mengubah gaya-gaya dalam pada struktur. Jadi, akibat penurunan tanah harus di-inputkan kembali dalam perhitungan gedungnya.

Bila diharapkan suatu gedung berpondasi dangkal berdiri di a

tas tanah lunak tanpa mengalami kerusakan yang berarti, gedung tersebut haruslah memenuhi beberapa persyaratan berikut :

1. Gedung harus cukup kaku untuk melawan perbedaan penurunan (differential settlement) sehingga hampir tidak ada differential settlement pada tanah akibat konsolidasi tanah dasar. Jadi konsolidasi tanah yang diakibatkan oleh berat gedung adalah praktis merata (uniform).
2. Gedung tersebut haruslah mengakibatkan reaksi perlawanan tanah yang tidak merata sedemikian rupa sehingga dihasilkan penurunan konsolidasi yang merata seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk penurunan δ diatas media elastis ,penurunan merata akibat beban tak merata

3. Jumlah reaksi total tanah dasar haruslah sama dengan berat gedung. Jadi

$$\int \sigma .dA = W = \text{berat gedung.}$$
4. Memenuhi toleransi differential settlement untuk bangunan beton yaitu 0.002 s/d 0.003, untuk bangunan baja yaitu 0.006 s/d 0.008.

Sampai saat ini belum pernah dicoba pendekatan di atas karena antara lain kesulitan dalam mendapatkan konfigurasi tegangan reaksi tanah yang menghasilkan penurunan konsolidasi yang merata. Hal ini karena konfigurasi tegangan yang menyebabkan penurunan konsolidasi yang merata tersebut juga sangat tergantung dari antara lain : tebal lapisan tanah yang memampat, jumlah lapisan, jenis lapisan dan parameter pemampatannya dan dimensi gedungnya.

Telah dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan alat bantu program komputer untuk melihat bagaimana sistem struktur gedung yang berpondasi dangkal ditinjau terhadap penurunan konsolidasi merata (Lastiasih dan Mochtar,2004).Dari penelitian tersebut diusulkan suatu metoda interaktif struktur – tanah sedemikian rupa sehingga gedung bertingkat dengan pondasi dangkal dapat dibuat mengalami penurunan yang relative merata sehingga tidak rusak selama terjadinya peristiwa konsolidasi tanah. Usulan metoda inilah yang diulas dalam makalah ini.

2. Dasar perhitungan penurunan konsolidasi

Bilamana suatu lapisan tanah yang “compressible” dan jenuh air diberi penambahan beban, penambahan beban pada awalnya akan diterima oleh air didalam pori tanah sehingga tekanan air pori akan naik secara mendadak. Kondisi tersebut menyebabkan air pori berusaha untuk mengalir keluar, dan kemudian peristiwa ini secara lambat laun disertai dengan pemampatan lapisan tanah yang terbebani. Kejadian ini disebut sebagai penurunan konsolidasi (consolidation settlement) dari tanah tersebut.

Perhitungan penurunan konsolidasi secara umum melibatkan tiga persamaan utama yaitu :

1. Persamaan untuk menghitung distribusi tegangan akibat beban di permukaan tanah pada suatu lokasi tertentu di bawah muka tanah;

$$\Delta p_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(L^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

$$L = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Dimana :

P = beban titik

Z = kedalaman dari muka tanah ke titik yang ditinjau

X = jarak horisontal dari beban titik ke titik yang ditinjau

2. Persamaan perhitungan konsolidasi pada tiap lapisan tanah, berdasarkan distribusi tegangan yang didapat dari persamaan pertama untuk waktu tak hingga;

- Kondisi tanah terkonsolidasi normal ($\sigma_0' = \sigma_c'$)

$$S_c = \frac{Cc \times H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right)$$

- Kondisi tanah terkonsolidasi lebih ($\sigma_0' < \sigma_c'$)

Bila $\sigma_0' + \Delta\sigma \leq \sigma_c'$ maka :

$$S_c = \frac{Cs \times H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right)$$

Bila $\sigma_0' + \Delta\sigma > \sigma_c'$ maka :

$$S_c = \frac{Cs \times H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_c'}{\sigma_0'} \right) + \frac{Cc \times H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_c'} \right)$$

Dimana :

H = tebal lapisan lempung

E_0 = angka pori awal (initial void ratio)

C_c = indeks kompresi (*compression index*)

C_s = indeks mengembang (*swelling index*)

$\Delta\sigma$ = besarnya tegangan akibat pembebanan di muka tanah (*surcharge*)

σ_0' = tegangan overburden efektif (*effective overburden pressure*)

σ_c' = tegangan prakonsolidasi efektif (*effective praconsolidation pressure*)

3. Persamaan untuk perhitungan kecepatan penurunan konsolidasi.

$$t = \frac{T_v \cdot H_{dr}^2}{c_v}$$

Dimana :

t : waktu untuk menyelesaikan konsolidasi

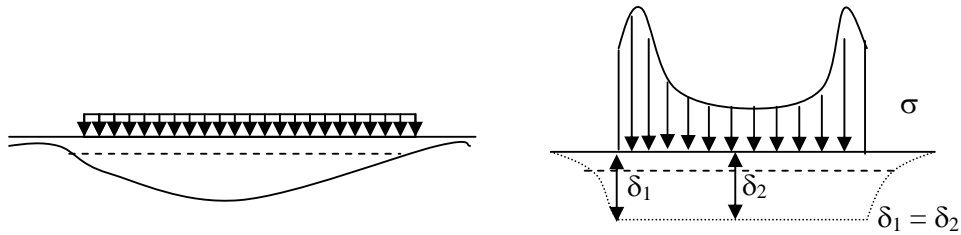
H_{dr} : panjang aliran rata-rata yang harus ditempuh oleh air pori selama proses konsolidasi

T_v : Faktor waktu

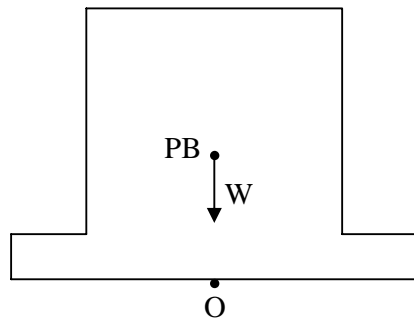
c_v : koefisien konsolidasi

3. Asumsi dasar yang digunakan dalam usulan metoda perhitungan interaktif struktur pondasi

1. Diatas media elastis, penurunan yang merata tidaklah dihasilkan oleh beban yang merata. Sebaliknya beban merata menghasilkan penurunan yang tidak merata.



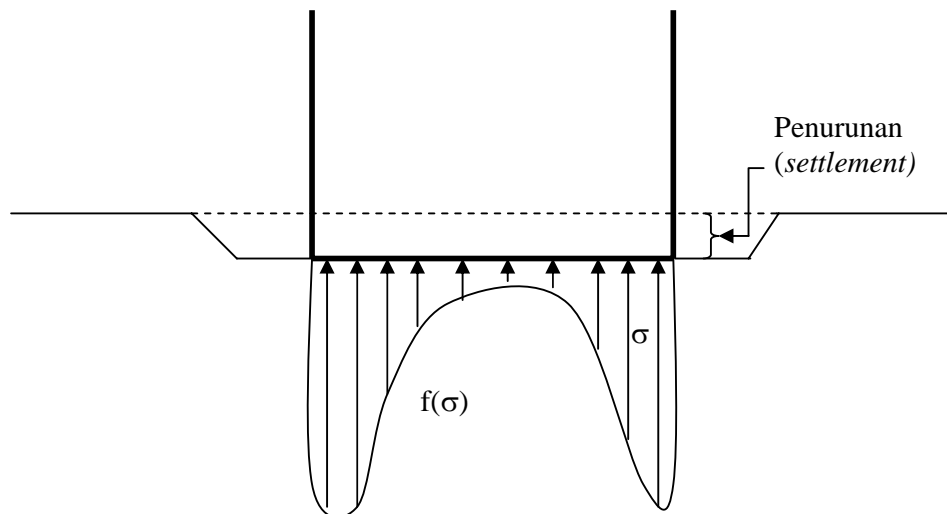
2. Supaya penurunan merata dan tidak miring gedung dibuat simetris



PB = pusat berat gedung

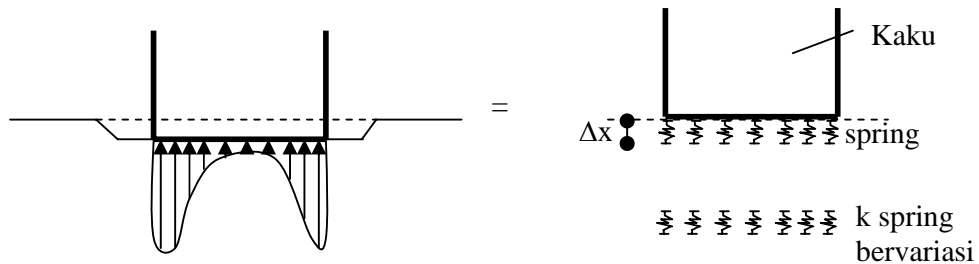
O = pusat bidang kontak pondasi

3. Gedung kaku tahan diferensial settlement, jadi settlement dianggap merata jadi gedung mengalami penurunan sebagai berikut :

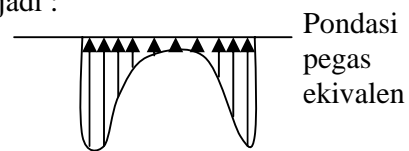


$$w = \int \sigma \cdot dA$$

4. Bisa dicari reaksi tanah sedemikian rupa dengan distribusi tegangan (σ) sehingga didapatkan $w = \int \sigma \cdot dA$. Reaksi ini adalah reaksi yang menghasilkan penurunan (*settlement*) konsolidasi merata untuk jangka waktu tertentu.
5. Bila gedung tahan berdiri diatas pondasi pegas ekivalen berarti gedung tersebut OK.



Sehingga reaksi menjadi :



$$k_{si} = \frac{\text{Gaya.per.pegas}}{S_{ct}} = \frac{F_i}{S_{ct}}$$

t = waktu tertentu misal 20 tahun

6. Terlebih dahulu dicari daya dukung tanah yang di atas tanah tersebut akan dibangun suatu gedung, apakah tanah tersebut mampu bila di atasnya dibangun gedung dengan 1 atau 2 ataupun 3 tingkat. Apabila ternyata tanah tersebut tidak mampu ditinjau dari daya dukungnya, ada beberapa alternatif yang bisa dipergunakan yaitu :
- Dengan memperbaiki tanah tersebut terlebih dahulu
 - Dengan memperlebar pondasi dari gedung tersebut
 - Kombinasi dari Alternatif 1 dan 2
 - Tidak jadi membangun di atas tanah tersebut dengan pondasi dangkal.

7. Setelah diketahui daya dukung tanah mampu, mulai dicari konfigurasi pembebanan. Terlebih dahulu diasumsikan bahwa beban yang berada di atas titik berat gedung \approx titik pusat bidang kontak pondasi dengan tanah, setelah itu dihitung besarnya tegangan yang terjadi pada lapisan dan titik yang ditinjau.
8. Dengan diketahui besarnya tegangan akibat pembebanan pada permukaan tanah maka dapat dihitung besarnya penurunan konsolidasi tiap lapisan, dan dari sinilah didapatkan total penurunan yang terjadi. Bila penurunan ini tidak sama di sembarang titik, maka proses iterasi untuk mencari pembebanan mulai dilakukan. Proses iterasinya dilakukan dengan menambah nilai P (beban di permukaan tanah) yang berada diujung-ujung dan mengurangi nilai P yang berada ditengah-tengahnya. Iterasi baru berhenti jika penurunan total yang dihasilkan pada sembarang titik besarnya sama. Toleransi untuk beda penurunan yang masih dianggap sama sebesar 0,1 inchi atau 2,5 mm
9. Setelah mendapatkan konfigurasi pembebanan yang dimaksud, yaitu yang bisa menyebabkan terjadinya penurunan yang merata di sembarang titik, maka dapat diketahui reaksi yang terjadi pada tanah. Penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi tanah dasar ini pada tiap lapisan di sembarang titik besarnya berlainan, tetapi bila ditotal dari semua lapisan itu hasilnya sama di sembarang titik.
10. Reaksi tanah yang menghasilkan penurunan konsolidasi tanah yang merata di atas dapat dianggap sama dengan reaksi tanah yang melawan beban pondasi gedung. Jadi bila misalnya tanah diasumsikan sebagai media elastis berupa sekumplan pegas, pegas-pegas tersebut harus dibuat memiliki konstanta pegas yang tidak sama sehingga dengan penurunan yang merata (sama), reaksi pegas (= reaksi tanah) tidaklah merata.

$$k_{si} = \frac{F_i}{\delta_i} \dots (1)$$

Jumlah total reaksi pegas ini harus sama dengan jumlah total berat gedungnya.

$$\int F \cdot dA = W \dots (2)$$

$$W = \sum_{i=1}^n F_i$$

$$W = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot k_{si}$$

Karena $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \dots = \delta_n = \delta$, maka didapat

$$W = \delta_i \sum_{i=1}^n k_{si} = \delta \sum_{i=1}^n k_{si} \dots (3)$$

Bila dikaitkan dengan umur rencana dari struktur maka δ yang dipakai sebagai acuan bukanlah δ_{total} yang dihasilkan dari perumusan Sc_{total} untuk waktu tak terhingga, melainkan

$$\delta = \bar{U} \times \delta_{total}, \text{ atau}$$

$$\bar{\delta} = \bar{U}_{\%} \times Sc_{total} \dots \dots (4)$$

dimana U = derajat konsolidasi berdasarkan umur rencana gedung.

11. Kemudian harus dicek terlebih dahulu apakah daya dukung tanah mampu memenuhi atau tidak. Apabila telah memenuhi persyaratan daya dukung tanah maka gedung tersebut akan diuji kekuatannya bila diletakkan pada tanah yang dianggap sebagai media elastis yang terdiri dari sekumpulan pegas yang mempunyai konstanta pegas berlainan.
12. Dengan meletakkan gedung pada tanah yang dianggap terdiri dari sekumpulan pegas yang mempunyai konstanta pegas berlainan maka dihasilkan gaya-gaya dalam dari gedung tersebut. Setelah diketahui reaksi-reaksi dari gedung

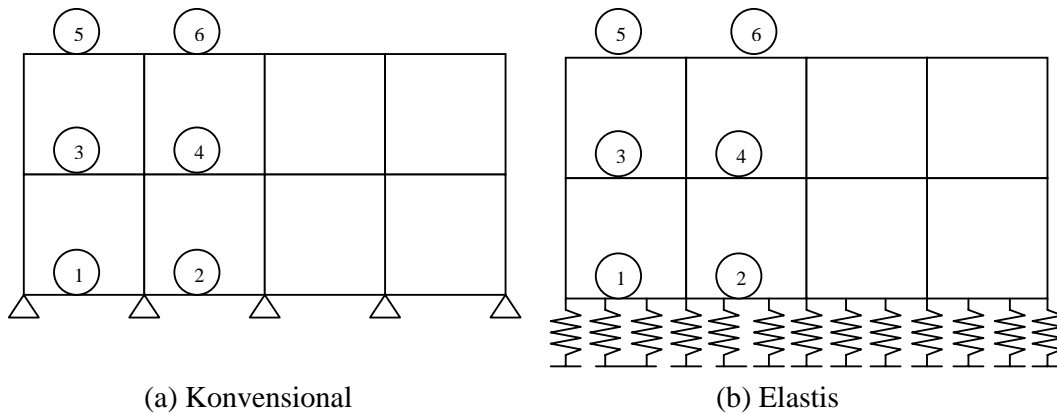
tersebut maka reaksi tersebut diterapkan pada tanah dibawahnya apakah penurunan yang terjadi masih merata atau tidak atukah terjadi differential settlement yang masih memenuhi batasan differential settlement untuk bangunan beton yaitu 0.002 s/d 0.003 setengah bentang bangunan dan untuk bangunan baja yaitu 0.006 s/d 0.008

13. Apabila penurunannya merata maka sampai umur rencana gedung tersebut tidak akan mengalami retak dan apabila penurunannya tidak merata maka gedung tersebut akan mengalami retak sehingga perlu diubah dimensi dari bagian struktur gedung tersebut hingga mampu menerima reaksi tersebut hingga umur yang direncanakan. Kontrol retak yang dilakukan berdasarkan Pedoman ACI yang menentukan bahwa z tidak melampaui 175 kip/inchi (30.6 MN/m) untuk konstruksi yang terlindung dan z tidak melampaui batas 145 kip/inchi (25.4 MN/m) untuk konstruksi yang dihujan-anginkan. Dimana z dapat dicari dari persamaan

$$z = f_s \times \sqrt[3]{d_c \times A} = \frac{w}{C\beta_h} \quad \dots(5)$$

4. Analisa

Dengan menggunakan metoda perhitungan interaktif struktur pondasi di atas tanah lunak yang menyertakan pengaruh penurunan konsolidasi jangka panjang dicoba diterapkan pada struktur dengan lebar bangunan 12 m, jarak kolom 3 m dan jumlah tingkat 1 seperti terlihat pada Gambar 2. Struktur ini dicoba dengan metode yang diusulkan pada penulisan kali ini dan juga dengan metode konvensional. Diharapkan dengan membandingkan kedua metode ini, maka dapat kita ketahui besarnya settlement dan momen yang terjadi pada struktur tersebut. Sehingga bisa direncanakan gedung yang memperhatikan settlement yang terjadi.



Gambar 2. Pemodelan struktur

Setelah diadakan perhitungan dengan kedua metoda maka didapatkan hasil sbb :

Momen yang terjadi pada balok dapat dilihat pada Tabel 1.

- Konvensional adalah metoda yang tidak memasukkan penurunan pada perhitungan strukturnya.
- Elastis adalah metoda yang memasukkan penurunan (settlement) pada perhitungan strukturnya.

Tabel 1

No	Konvensional			Elastis		
	Mtump.ki	Mlap.	Mtump.ka	Mtump.ki	Mlap.	Mtump.ka
1	0.352	0.1975	0.3946	1.3152	5.2917	8.0209
2	0.3808	0.1902	0.3804	6.1899	2.5017	6.3826
3	1.6247	1.2894	2.2651	2.855	1.5074	0.7593
4	2.1844	1.0681	2.1441	3.044	1.3164	0.9515
5	0.9665	0.926	1.4687	2.1656	0.9235	0.4409
6	1.4315	0.7093	1.4297	1.6771	1.0637	0.5458

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perhitungan konvensional menghasilkan momen yang lebih kecil daripada perhitungan dengan metode yang diusulkan ini. Dari hasil tersebut dapat ditarik benang merah kenapa terjadi kerusakan dalam bentuk retak-retak pada dinding, balok dan kolom. Dengan melihat bahwa momen yang sesungguhnya terjadi jauh lebih besar apabila kita memperhitungkan settlement yang

ada daripada momen yang dihasilkan dari metoda tanpa memperhitungkan settlement. Oleh karena itulah mengapa sering terjadi kerusakan berupa retak-retak pada bangunan yang dibangun di atas tanah lempung lunak.

Pada perhitungan konvensional dihasilkan penurunan yang tidak merata pada tiap – tiap titik yang ditinjau melainkan semakin besar penurunan yang terjadi pada setengah bentang bangunan. Sedangkan pada metode elastis penurunan yang dihasilkan cenderung merata karena reaksi yang terjadi pada tanah tidak merata . Hal ini dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Penurunan pada struktur dengan metode elastis

No Titik	Reaksi pada tanah	Sc (m) pada Metoda Elastis
1	7.38713	0.2270
2	6.51625	0.2287
3	6.29995	0.2323
4	6.26056	0.2366
5	6.26055	0.2382
6	6.26054	0.2396
7	6.26053	0.2407
8	6.26054	0.2390
9	6.26055	0.2383
10	6.26056	0.2366
11	6.29995	0.2323
12	6.51625	0.2287
13	7.38713	0.2270

5. Kesimpulan

Dari uraian-uraian yang telah dikemukakan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Kalau gedungnya kaku sehingga penurunan relative merata maka reaksi media elastis yang terjadi tidak merata, inilah yang membedakan dengan perhitungan metode konvensional dimana reaksi pada tanah merata sehingga menghasilkan penurunan yang tidak merata.

2. Gedung bertingkat berpondasi dangkal yang dibangun diatas tanah yang compressible tidak boleh dihitung dengan metode konvensional, perhitungan struktur harus memperhitungkan interaksi tanah struktur , karena momen yang terjadi sesungguhnya jauh lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 336 (1988). "Suggested analysis and design procedures for combined footings and mats", *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Detroit, Mich. U.S.A., Vol. 85, No. 3, pp. 304-324.
- ACI Committee 336 (1989). Closure to "Suggested analysis and design procedures for combined footings and mats", *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Detroit, Mich. U.S.A., Vol. 86, No. 1, pp. 113-116.
- Al-Shamrani, M. A. and Al-Mashary, F. A. (1999), "Development of A Computer Program for Study of Soil-Structure Interaction," Final Report for Project No. R-7-416, Research Center, College of Engineering, King Saud University, Riyadh Saudi Arabia.
- Arif, Musta'in, 2003, "Studi Pengaruh Penurunan Konsolidasi Tanah Dasar terhadap Gedung Berpondasi Dangkal", Thesis Pasca Sarjana Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.
- Bowles, J.E. (1996) , "Foundation Analysis and Design", 5th Edition, McGraw-Hill, 1175 p.
- Buisman, A. S. K. (1936). "Results of Long Duration Settlement Tests," Proceedings, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation engineering, Vol. 1, pp. 103-106.
- Burland, J. B., B. B. Broms and V. F. B. de Mello (1977). "Behaviour of foundations and structures", *Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 495-546.
- Chamecki, S. (1956). "Structural Rigidity in Calculating Settlements," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 82, SM 1, pp. 1-19.
- Dewobroto, Wiryanto., 2003, "Aplikasi Sains dan Teknik dengan Visual Basic 6.0", Penerbit PT. Elex Media Komputindo.
- Goschy, B. (1978). "Soil-Foundation-Structure Interaction," *Journal of the Structure Division*, ASCE, Vol. 104, No. ST5, pp. 749-761.

Hemsley, J. A. (ed.) (2000). "*Design applications of raft foundations*", Thomas Telford Ltd., London, U.K., 626 pp.

Hetényi, M. (1946). "*Beams on elastic foundation*", The University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich., U.S.A., 255 pp.

Horvilleur, J. F. and V. Patel (1995). "Mat foundation design - a soil-structure interaction problem", *Design and Performance of Mat Foundations; State-of-the-Art Review*, E. J. Ulrich (ed.), American Concrete Institute, Detroit, Mich., U.S.A., pp. 51-94.

King, G. J. W. and Chandrasekaran, V. S. (1974). "An Assessment of the Effects of Interaction Between a Structure and its Foundation," *Proceedings, Conference on Settlement of Structures*, Cambridge, Pentech Press, London, pp.368-383.

Lambe T.W and Whitman R.V: *Soil Mechanics*. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 1969, 553 pp.

Lee, I. K. and Harrison, H. B. (1970). "Structure and Foundation Interaction Theory," *Journal of Structure Division*, ASCE, Vol. 96 No. ST2, pp. 177-197.

Lee, I. K. and Brown, P. T. (1972). "Structure-Foundation Interaction Analysis," *Journal of Structure Division*, ASCE, Vol. 98 No. ST11, pp. 2413-2431.

Lukito, Doddy E., 1998, "Metode Perhitungan Penurunan Konsolidasi pada Segala Titik di Permukaan Tanah Dengan Menggunakan Program Komputer", Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.

Lysmer, J., M. Tabatabai-Rassi, F. Jajirian, S. Vahdani, and F. Ostadan, 1981, "SASSI C A System for Analysis of Soil-Structure Interaction", Report UCB/GT/81-02. Berkeley: University of California,

Lysmer, J., T. Udka, C. P. Tsai, and H. B. Seed. 1975, "FLUSH: A Computer Program for Approximate 2-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems", Report EERC 75-30. Berkeley: University of California,

Meyerhof, G.G. (1947). "The Settlement Analysis of Building Frames," *The Structural Engineer*, Vol.25, pp. 369-409.

Meyerhof, G.G. (1953). "Some Recent Foundation Research and its Application to Design," *The Structural Engineer*, Vol. 31, pp. 151-167.

Miyahara, F. and Ergatoudis, J. G. (1976). "Matrix Analysis of Structure-Foundation," *Journal of Structure Division*, ASCE, Vol. 102, No. ST1, pp. 251-265.

Mochtar, I.B., 2001, "Tinjauan Beberapa Kasus Masalah Pondasi di Lapangan (Belajar dari Pengalaman)", Majalah TORSI, Jurusan Teknik Sipil ITS, Nopember 2001.

Tavio, 1998, "Analisa Pengaruh Konfigurasi Struktur dan Ketebalan Pondasi Terhadap Gaya Dalam Struktur Berdasarkan Peninjauan Interaksi Struktur-Tanah pada Gedung

Berpondasi Dangkal di Atas Tanah Sebagai Media Elastis”, Thesis Pasca Sarjana Jurusan Teknik Sipil FTS-ITS.

Terzaghi, Karl, Peck, Ralph B., Mesri, Gholamreza (1996),” Soil Mechanics in Engineering Practice”, 3rd Edition, Wiley-Interscience Publication

Wood, L. A. and Larnach, W. J. (1975). “The Interactive Behavior of a Soil-Structure System and its Effect on Settlements,” *Proceedings of the Technical Session of a Symposium* held at University of New South Wales, Australia, pp. 75-88.