

# Studi Model Centrifuge Dari Grup Tiang Yang Dibebeani Beban Lateral Pada Lapisan Lempung: Karakteristik Bending Momen

T.Ilyas

Department of Civil Engineering  
Faculty of Engineering, University of Indonesia, Depok 16424  
E-mail: t\_ilyas@rad.net.id

## Abstrak

Sebuah seri percobaan dengan alat centrifuge dilaksanakan dilapisan lempung normally consolidated (NC) untuk mengetahui karakteristik bending momen dari grup tiang akibat pembebanan lateral statis. Grup tiang mempunyai denah yang simetris dengan konfigurasi tiang tunggal, 2x1, 2x2, 3x3 dan 4x4 grup tiang dengan jarak antar tiang 3 kali lebar tiang. Pile cap dari bahan aluminium yang masif yang terletak diatas permukaan tanah digunakan untuk mengikat tiang dalam grup. Profil bending momen untuk tiang grup dipresentasikan dengan rinci. Rumus empiris untuk grup tiang dilapisan NC disajikan untuk merancang kapasitas bending momen yang terjadi pada kedalaman tiang dalam tanah.

**Kata kunci:** centrifuge, normally consolidated.

## Abstract

A series of centrifuge model tests was conducted to study the behaviour of laterally loaded pile group in NC clay. Focus of study is to examine the bending moment characteristic of the pile groups. Pile group has a symmetrical lay-out with configuration of 2, 2x2, 3x3 and 4x4 with center-to-center pile spacing of 3 width. Alluminium pile cap, which is located upper ground surface, is used to tie-up the piles. Bending moment profiles for pile group are presented in detail. Empirical formula for designing bending moment capacity of the pile in the group is proposed.

**Keywords:** centrifuge, normally consolidated.

## 1. Pendahuluan

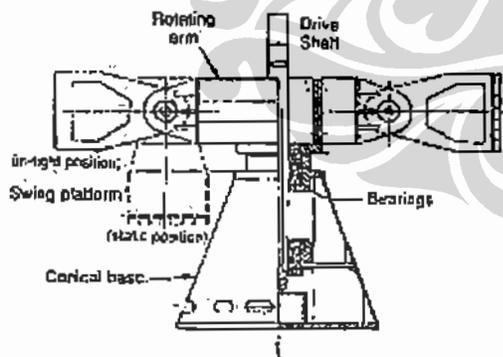
Kinerja fondasi tiang yang menahan gaya lateral merupakan hal yang penting dalam praktek geoteknik. Fondasi tiang disamping menahan beban vertikal juga menahan beban horisontal seperti struktur lepas pantai yang menahan beban angin dan beban gelombang, dermaga pelabuhan yang menahan beban horisontal ketika kapal merapat pada dermaga, menara transmisi yang menahan beban angin dan bangunan gedung terutama bangunan bertingkat tinggi yang berada pada daerah gempa yang menahan beban gempa. Semua struktur bangunan tersebut memerlukan kapasitas daya dukung untuk menahan beban lateral atau horisontal. Karena itu pengetahuan mengenai sifat fondasi tiang yang menahan beban lateral menjadi sangat penting bagi *geotechnical engineer*.

Penelitian mengenai grup tiang yang dibebani beban lateral dilapisan pasir dengan menggunakan alat centrifuge telah cukup banyak dilakukan oleh peneliti terdahulu[5-7]. Namun masih sedikit penelitian mengenai kinerja grup tiang dilapisan lempung akibat pembebanan lateral. Beberapa peneliti [2,3] melakukan studi pada tiang tunggal dilapisan lempung. Karena karakteristik lempung sangat berbeda dengan pasir maka sebuah seri pengujian dengan alat centrifuge dilakukan untuk menguji perilaku grup tiang yang dibebani gaya lateral statis dilapisan lempung *normally consolidated*. Hasil profil bending momen tiang dipresentasikan pada makalah ini dengan cukup rinci. Rumus empiris untuk menentukan kapasitas bending momen tiang dari grup tiang disajikan dalam makalah ini.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan alat centrifuge yang mempunyai kemampuan lebih besar dibandingkan dengan menggunakan alat uji konvensional. Alat centrifuge dapat menghasilkan karakteristik tanah yang sama dengan karakteristik tanah yang sebenarnya sehingga tegangan efektif yang terjadi pada model, sama dengan tegangan efektif prototip yang sebenarnya. Hal semacam ini tidak mungkin dilakukan pada tes konvensional pada kondisi 1g.

## 2. Pengaturan (set-up) eksperimen

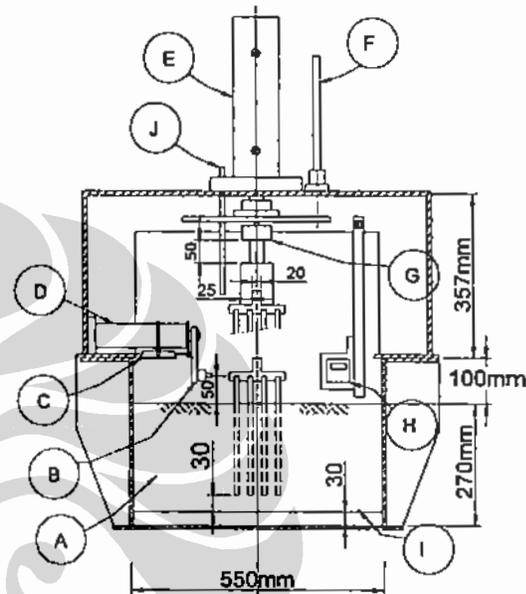
Alat centrifuge yang dipakai dalam studi ini adalah geotechnical centrifuge dari National University of Singapore dengan radius 2m dan *beam* dengan dua buah *swing platform* yang berada di kedua sisinya, seperti terlihat pada Gambar 1. Alat centrifuge ini mempunyai kapasitas 40g-ton dan maksimum percepatannya (*g-level*) 200g. Rincian penggunaan alat ini telah dikemukakan [4]. Seluruh tes dilaksanakan pada akselerasi 70g. Pada Gambar 2 diperlihatkan *model set-up* yang merupakan satu paket yang kompak. Kontainer yang terbuat dari bahan *stainless steel* mempunyai diameter internal 550mm, tingginya 340mm dan tebalnya 5 mm



Gambar 1.  
Tampak/potongan dari  
NUS geotechnical centrifuge

Sebuah rangka yang terbuat dari besi dengan dua buah *actuator* diletakkan di atas kontainer yang kemudian diikat dengan mur-baut. *Actuator* vertikal berada dibagian tengah atas dari rangka besi dan

*actuator horisontal* diletakkan dibagian kiri bawah dari rangka besi. Pada kontainer juga terdapat kamera yang dihubungkan melalui CCTV keruang kontrol untuk memonitor jalannya percobaan. Dua buah LVDT (*linear variable displacement transducer*) digunakan untuk mengukur pergerakan atau perpindahan *actuator* vertikal dan horisontal.



- LEGENDA:
- |                |                     |
|----------------|---------------------|
| A. Kaolin Clay | F. LVDT(V)          |
| B. Load cell   | G. Load Cell        |
| C. LVDT(H)     | H. Laser transducer |
| D. Actuator(H) | I. Sand Layer       |
| E. Actuator(V) | J. Guide rod        |

Gambar 2.  
Model set-up

Model tiang terbuat dari pipa aluminium berlubang dengan penampang bujur sangkar dengan ukuran sisi 9.53mm dan tebal 1.59mm. Beberapa model tiang diberi instrumentasi *strain gauges* yang berjumlah sepuluh pasang yang diproteksi dengan lapisan epoxy tipis. Untuk membuat model tiang aluminium digunakan formula:

$$E_m I_m = E_p I_p \quad (1)$$

dimana  $E_m$  adalah modulus elastisitas dari model tiang,  $I_m$  adalah momen inersia dari model tiang,  $E_p$  adalah modulus elastisitas dari tiang prototip dan  $I_p$  adalah momen inersia dari tiang prototip. Besaran  $E_m I_m$

model tiang 384 kNm<sup>2</sup> dan besaran  $E_p I_p$  prototip 922 kNm<sup>2</sup>. Panjang model tiang adalah 260 mm dan yang terbenam dalam tanah 210 mm. Panjang tiang prototip adalah 18.2m dengan tiang yang terbenam (embedded) 14.7m.

*Pile cap* digunakan untuk mengikat tiang sehingga menjadi grup tiang. Untuk membuat model *pile cap* digunakan formula:

$$E_m A_m = E_p A_p \quad (2)$$

dimana  $A_m$  adalah luas penampang model kepala tiang yang menerima beban lateral dan  $A_p$  adalah luas penampang prototip kepala tiang yang menerima beban lateral.

*Pile cap* dibuat dengan rancangan khusus dimana tiang diikat secara ketat oleh *screw*. *Pile cap* berada 50 mm atau 3.5 m pada skala prototip diatas permukaan tanah. Contoh *pile cap* dapat dilihat pada Gambar 3.



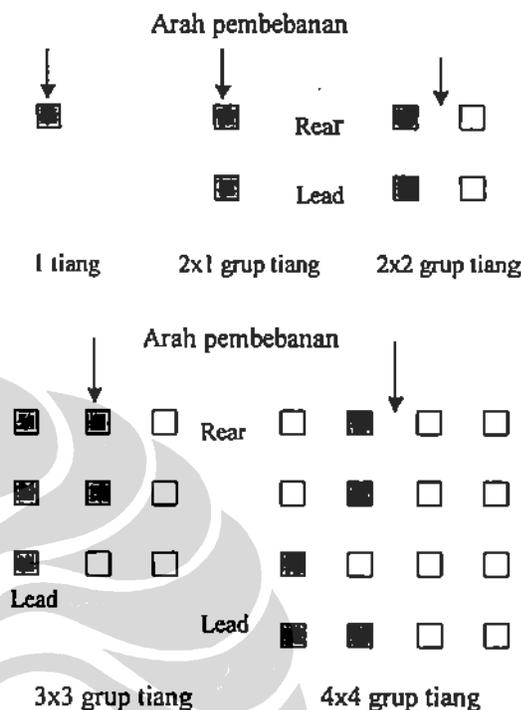
Gambar 3.

Jenis-jenis model *pile cap*

Contoh tanah yang digunakan untuk percobaan ini adalah kaolin dari Malaysia yang memiliki *properties: unit weight*  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ , *liquid limit*  $LL = 79.8\%$ , *plastic limit*  $PL = 35.1\%$ , *compression index*  $C_c = 0.55$ , *recompression index*  $C_s = 0.14$ , dan *coefficient of permeability*  $k = 2.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ .

Persiapan contoh lempung NC. *Slurry* kaolin yang telah dipersiapkan dalam kontainer dengan  $LL=150\%$  di-*deaired* selama 24 jam. Setelah proses *deairing* selesai contoh tanah dikonsolidasikan (self weight) dengan centrifuge pada 70-g agar

terjadi disipasi dari tegangan air pori. Diperlukan waktu 6 jam untuk mencapai derajat konsolidasi minimal 95%. Tinggi contoh setelah konsolidasi berkisar sekitar 240 mm.



Gambar 4.

Konfigurasi tiang dan grup tiang

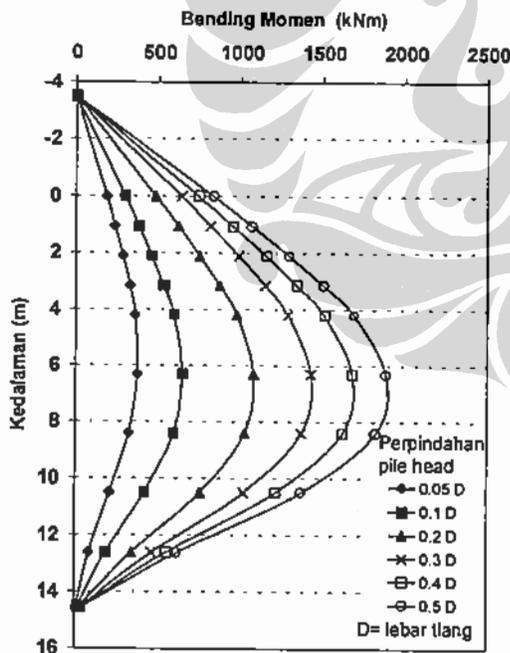
Setelah proses konsolidasi selesai centrifuge dihentikan dan persiapan untuk instalasi tiang dilakukan. Model tiang dan atau grup tiang dipancang kedalam contoh tanah dengan kondisi 1g, menggunakan *actuator* vertikal sampai tiang mencapai kedalaman 210 mm (14.7 m pada model prototip). Setelah pemancangan selesai centrifuge diakselerasi-kembali 70g lebih kurang 30 menit untuk memberikan waktu agar tanah berdisipasi kembali karena eksese tegangan pori pada saat pemancangan tiang atau grup tiang.

Konfigurasi grup tiang dapat dilihat pada Gambar 4. Model tiang yang berwarna gelap adalah tiang yang diberi instrumentasi *strain gauges*. Maksimal hanya 5 tiang instrumentasi dalam 3x3 dan 4x4 grup tiang karena keterbatasan *channel strain meter* untuk mengakomodasi *strain gauges* yang terpasang pada tiang instrumentasi.

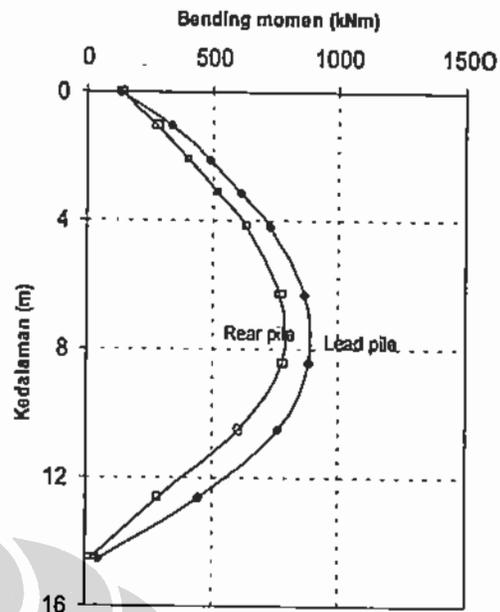
Pembebanan lateral dilaksanakan terhadap tiang atau grup tiang oleh *actuator horizontal* dengan memberikan *displacement* (perpindahan) pada *pile head* yang berada 50 mm (3.50 m pada prototip model) diatas permukaan tanah. Besarnya kecepatan pembebanan 0.05 mm/detik. Pembacaan beban lateral, defleksi dan *strain gauge* dilakukan pada interval tertentu secara regular selama proses pembebanan.

### 3. Hasil percobaan

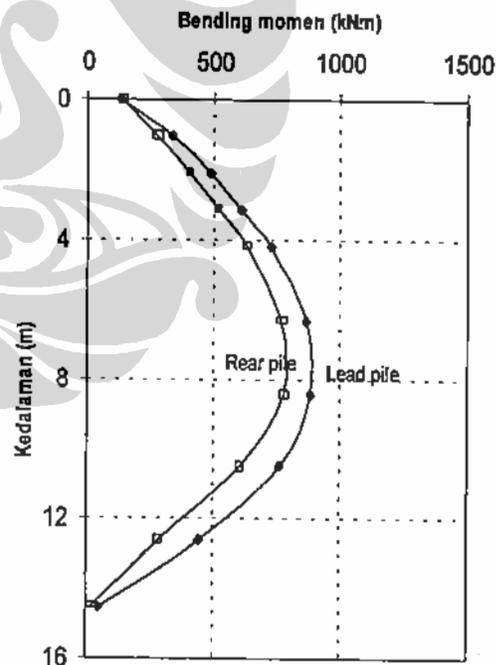
Untuk tiang tunggal sifat *pile cap* nya adalah bebas sehingga tidak terjadi bending momen pada ujung tiang. Bending momen sepanjang tiang diukur oleh sepuluh pasang *strain gauges* yang diletakkan sepanjang *shaft* tiang. Profil bending momen tiang tunggal dapat dilihat pada Gambar 5. Kedalaman bending momen maksimum terletak antara 7D-8D dibawah permukaan tanah. Bending momen membesar jika perpindahan *pile head* akibat beban lateral membesar.



Gambar 5.  
Momen vs kedalaman untuk berbagai perpindahan pile head



Gambar 6.  
Momen vs kedalaman untuk lead dan rear pile dari 2x1 grup tiang

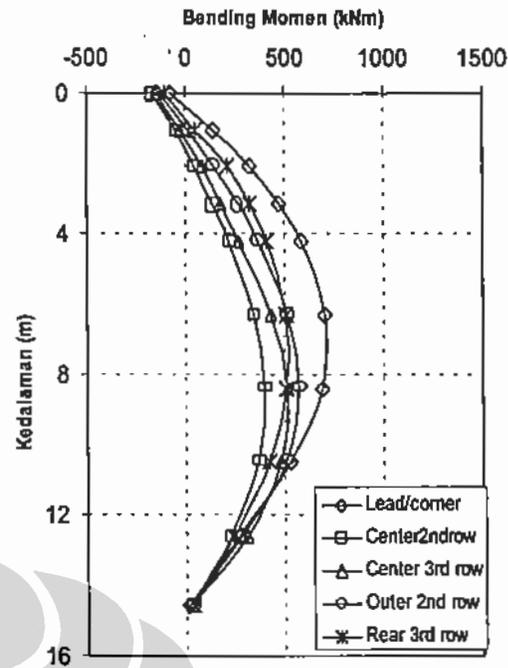


Gambar 7.  
Momen vs kedalaman untuk lead pile dan rear pile dari 2x2 grup tiang

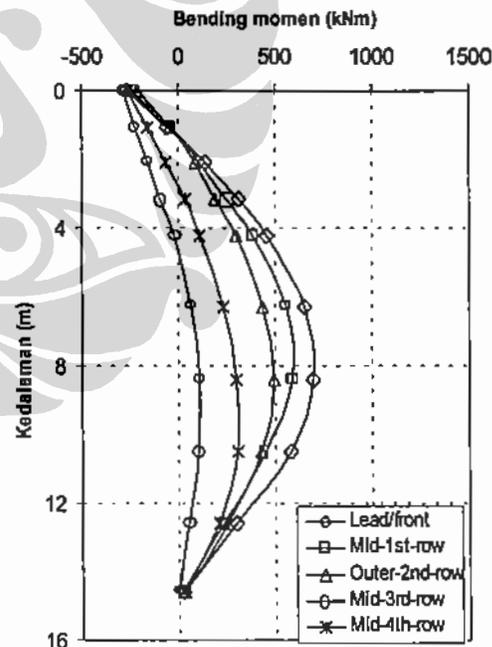
Bending momen dari grup tiang diamati mempunyai kecenderungan yang sama dengan bending momen dari tiang tunggal, dimana bending momen membesar jika perpindahan *pile head* akibat beban lateral juga membesar. Profil bending momen untuk 2x1, 2x2, 3x3 dan 4x4 tergambar pada Gambar 6, 7, 8 dan 9. Profil bending momen digambarkan untuk perpindahan *pile head* 0.5 D. Untuk 2x1 grup tiang, bending momen pada tiang *lead* lebih besar (5%) dibandingkan dengan tiang *rear*. Namun untuk 2x2 grup tiang, bending momen pada tiang *lead* jauh lebih besar (15%) dibandingkan dengan tiang *rear*.

Gambar 8 menunjukkan profil bending momen untuk 5 tiang instrumentasi dari 3x3 grup tiang. Seperti terlihat tiang *lead* menahan bending momen yang terbesar dalam grup tiang. Hal ini disebabkan oleh pengaruh *shadowing* dari tiang yang dimuka terhadap tiang yang dibelakangnya. Brown [1] pada lapisan pasir dan Rollin [8] pada lapisan lempung menemukan fenomena *shadowing* ini dalam studi *field test*-nya (3x3 grup tiang). Tiang pada baris pertama (*lead*) menerima beban (momen) lebih besar dari tiang pada baris kedua maupun ketiga. Dalam studi ini bending momen tiang *lead* lebih besar 30% dibandingkan dengan tiang *rear*. Untuk tanah lempung dilapisan over consolidated (OC) dijumpai kecenderungan yang sama dimana tiang *lead* menerima momen lebih besar 60% dari tiang *rear* [9].

Gambar 9 menunjukkan profil bending momen untuk 4x4 grup tiang. Seperti halnya dengan 3x3 grup tiang tiang *lead* merupakan tiang yang menahan momen terbesar dalam grup tiang. Tiang *lead* menahan bending momen hampir 100% lebih besar dari tiang *rear* (*middle*). Dari pemaparan profil bending momen untuk grup tiang terlihat semakin banyak jumlah tiang dalam grup akan semakin kecil bending momen yang ditahan oleh individual tiang dalam grup pada perpindahan *pile head* yang sama. Lokasi kedalaman bending momen maksimum untuk grup tiang berkisar antara 7-8 D dan tidak tergantung pada banyaknya tiang dalam grup.



Gambar 8.  
Momen vs kedalaman untuk 5 tiang instrumentasi dari 3x3 grup tiang



Gambar 9.  
Momen vs kedalaman untuk 5 tiang instrumentasi dari 4x4 grup tiang

#### 4. Formula empiris untuk kapasitas bending momen akibat beban lateral

Hasil tes seri yang diperoleh melalui observasi experimental menunjukkan tiang yang paling kritis dalam grup tiang akibat beban lateral adalah tiang *lead* atau tiang *front*. Untuk pemakaian secara praktis akan dicoba mencari hubungan antara momen, beban lateral, kedalaman dan jumlah tiang dalam grup bagi tiang *lead*.

Untuk mendapatkan hubungan secara empiris antara bending momen (BM), gaya lateral (H), kedalaman (z), serta jumlah tiang dalam grup (N) pada lapisan lempung NC diperlukan pemecahan secara matematis agar hubungan tersebut dapat terpenuhi

Bending momen (BM) mengikuti pola persamaan polynomial tingkat tiga sehingga persamaannya dapat ditulis :

$$BM = f(z) = A + cz + dz^2 + ez^3 \quad (3)$$

dimana A adalah bending momen pada permukaan tanah akibat beban lateral H dan c,d dan e adalah konstanta

Karena setiap grup tiang memiliki bidang momen yang terbentuk akibat beban lateral yang bekerja pada kepala tiang maka untuk setiap tiang *lead* dalam grup berlaku

$$BM = f(z,H) = (A + cz + dz^2 + ez^3) fH \quad (4)$$

dimana f adalah konstanta dari beban lateral H.

Akan dicari hubungan antara grup dengan 2 tiang, 4 (2x2) tiang, 9 (3x3) tiang dan 16 (4x4) tiang sehingga N= 2, 4, 9,16. Pola peningkatan jumlah tiang didekati dengan model  $N^{-0.5}$  sehingga persamaan model empirik menjadi :

$$BM = f(z,H,N) = (A + cz + dz^2 + ez^3) fH N^{-0.5} \quad \dots(5)$$

Untuk mencari parameter c, d, e dan f yang mewakili semua grup tiang diperoleh dengan bantuan program solver dari Excell 2000 maka parameter tersebut ditetapkan (diasumsikan) dulu.

Momen pada grup tiang 2x1 (N=2) untuk besaran H= H<sub>1</sub> dan kedalaman z = z<sub>1</sub>... z<sub>10</sub> diperoleh besaran momen: m<sub>11</sub>, m<sub>12</sub>.....m<sub>110</sub> dari pengukuran experimental dan dari persamaan (3) diperoleh :

$$BM_{11} = (A_{11} + c z_1 + dz_1^2 + ez_1^3) f H_1 N^{-0.5}$$

$$BM_{12} = (A_{12} + c z_2 + dz_2^2 + ez_2^3) f H_1 N^{-0.5}$$

$$\downarrow$$

$$BM_{110} = (A_{110} + c z_{10} + dz_{10}^2 + ez_{10}^3) f H_1 N^{-0.5}$$

Kemudian untuk H=H<sub>2</sub> dan z = z<sub>1</sub>.....z<sub>10</sub> maka diperoleh m<sub>21</sub>.....m<sub>210</sub> dari pengukuran dan dari persamaan (3) diperoleh:

$$BM_{21} = (A_{21} + c z_1 + dz_1^2 + ez_1^3) f H_2 N^{-0.5}$$

$$BM_{22} = (A_{22} + c z_2 + dz_2^2 + ez_2^3) f H_2 N^{-0.5}$$

$$\downarrow$$

$$BM_{210} = (A_{10} + c z_{10} + dz_{10}^2 + ez_{10}^3) f H_2 N^{-0.5}$$

Untuk H= H<sub>n</sub> dan z = z<sub>1</sub>.....z<sub>10</sub> maka :

$$BM_{n1} = (A_n + c z_1 + dz_1^2 + ez_1^3) f H_n N^{-0.5}$$

$$BM_{n2} = (A_2 + c z_2 + dz_2^2 + ez_2^3) f H_n N^{-0.5}$$

$$\downarrow$$

$$BM_{n10} = (A_{10} + c z_{10} + dz_{10}^2 + ez_{10}^3) f H_n N^{-0.5}$$

Momen pada grup tiang 2x2 (N=4) untuk besaran H= H<sub>1</sub> dan z = z<sub>1</sub>.....z<sub>10</sub> diperoleh besaran momen: m<sub>11</sub>, m<sub>12</sub>.....m<sub>110</sub> dari pengukuran experimental dan dari persamaan (3) diperoleh

$$BM_{11} = (A_{21} + c z_1 + dz_1^2 + ez_1^3) f H_2 N^{-0.5}$$

$$BM_{12} = (A_{22} + c z_2 + dz_2^2 + ez_2^3) f H_2 N^{-0.5}$$

$$\downarrow$$

$$BM_{110} = (A_{10} + c z_{10} + dz_{10}^2 + ez_{10}^3) f H_2 N^{-0.5}$$

Untuk H= H<sub>n</sub> dan z = z<sub>1</sub>.....z<sub>10</sub> maka :

$$BM_{n1} = (A_n + c z_1 + dz_1^2 + ez_1^3) f H_n N^{-0.5}$$

$$BM_{n2} = (A_2 + c z_2 + dz_2^2 + ez_2^3) f H_n N^{-0.5}$$

$$\downarrow$$

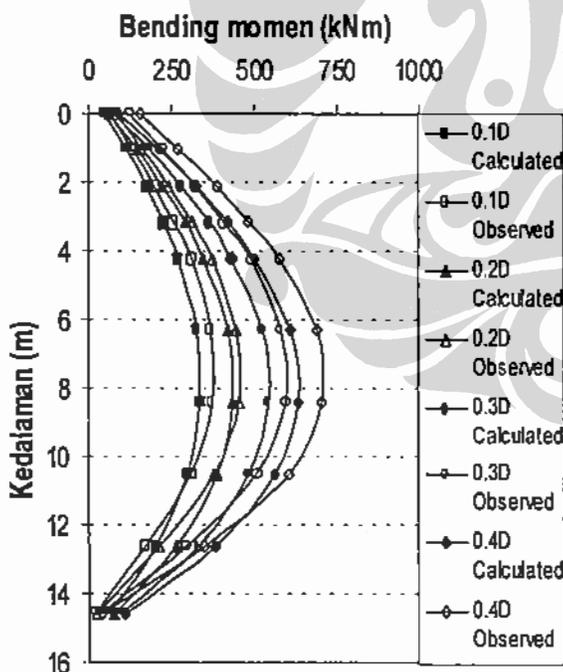
$$BM_{n10} = (A_{10} + c z_{10} + dz_{10}^2 + ez_{10}^3) f H_n N^{-0.5}$$

Dan seterusnya hingga grup tiang 4x4 ( $N=16$ ) dan setelah itu dilakukan sum of square dari  $\sum(m-BM)^2$  dari semua grup tiang.

Proses selanjutnya adalah meminimumkan 'sum of squared error' dengan bantuan program *solver* dari Excel sehingga diperoleh besaran parameter c, d, e dan f. Dengan memasukkan parameter c, d, e dan f pada persamaan (3) maka diperoleh persamaan empiris dari fungsi H, N dan z. Persamaan empiris untuk grup tiang dilapisan NC adalah :

$$M(H, N, z) = (2271.2 + 3119.6z - 132.3z^2 - 5.46z^3) \cdot \frac{0.000588H}{N^{0.5}} \dots (6)$$

Dibawah ini diperlihatkan besaran momen dari persamaan empiris dibandingkan momen observasi atau momen polynomial tingkat 3 untuk grup tiang 2x2 pada berbagai harga beban lateral.



Gambar 10.  
Grup tiang 2x2 observasi dan kalkulasi

Dari persamaan empiris untuk grup tiang 2x1 diperoleh prediksi lebih besar dari hasil observasi sebesar 20-25%; untuk grup tiang 2x2 terdapat prediksi lebih kecil dari hasil observasi sebesar 10-15% seperti terlihat pada Gambar 10; untuk grup tiang 3x3 terdapat prediksi lebih kecil dari observasi sebesar 20-30% dan untuk grup tiang 4x4 diperoleh prediksi lebih kecil dari observasi sebesar 30%-35%.

## 5. Kesimpulan

Pada studi ini sebuah seri dari percobaan uji lateral dengan alat centrifuge dilapisan lempung kaolin telah dilaksanakan. Percobaan mencakup tiang tunggal dan grup tiang mulai dari grup dengan 2 tiang sampai 16 tiang dengan jarak antar tiang 3D. Dibawah ini diuraikan kesimpulan yang diperoleh dari studi ini:

1. Bending momen dari tiang *lead* adalah yang terbesar dibandingkan dengan tiang dalam semua grup tiang. Pengaruh *shadowing* dari tiang *lead* terhadap tiang yang dibelakangnya membesar sejalan dengan meningkatnya jumlah tiang didalam grup [1,8].
2. Lokasi bending momen maksimum berkisar antara 7D-8D dibawah permukaan tanah dan tidak tergantung pada jumlah tiang dalam grup.
3. Formula empirik untuk menentukan kapasitas bending momen untuk grup tiang dengan denah simetris dapat dipergunakan untuk desain praktis.

## Daftar Acuan

1. Brown, D.A., Morrison, C & Reese, L.C 1988, "Lateral load behaviour of pile group in sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.125, No.11, pp. 1261- 1276.
2. Hamilton J.M, Dunnivant T.W, Murff.J.D, and Philips R, 1991 "Centrifuge study of laterally loaded pile behaviour in clay" Centrifuge 91,

- Ed. by Ko.H.Y, and McLean.F, A.A Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 285- 292
3. Kitazume.M, and Miyajima.S, 1994 "Lateral resistance of a long pile in soft clay" Centrifuge 94, Ed. by Leung.C.F, Lee.F.H, and Tan.T.S, A.A Balkema Publishers, Netherlands, 485-490.
  4. Lee, F.H., Tan, T S., Leung, C F., Yong, K Y., Karunaratne, G P & Lee, S.L. 1991, "Development of geotechnical centrifuge facility at the National University of Singapore", Centrifuge 91, Ed. by Ko H Y., and McLean F., AA Balkema Publisher, Netherlands, pp.11-17.
  5. McVay M, Bloomquist D, Vanderlaine D & Clausen J, 1994, "Centrifuge modeling of laterally loaded pile group in sand", Geotechnical Testing Journal, Vol. 17, No.2, pp.129-137.
  6. McVay, M.,Casper, R & Shang T.I 1995, "Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 19, No.1, pp.41-50.
  7. McVay, M., Zhang,L., Molnit, T & Lai,P. 1998, "Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands", Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE, pp. 1019-1025.
  8. Rollins, K.M., Peterson, K.T & Weaver, T.J 1998, "Lateral load behaviour of full scale pile group in clay", Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE, Vol.124, No.6, pp.468-478.
  9. T.Ilyas, B.S.Soepandji, 2001 "Kinerja Grup Tiang Yang Menerima Beban Lateral Di Lapisan Lempung: Studi Model Centrifuge" Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Geoteknik V-2001, Bandung.

