

Interaksi Tanah-Tiang-Basement Akibat Beban Lateral Gempa

Franciscus Xaverius Toha¹⁾

Abstrak

Dalam interaksi dinamik tanah-tiang fundasi-struktur basement akibat beban gempa, gaya lateral tiang fundasi, gesekan tanah pada dinding sisi basement dan gaya lateral pada dinding basement akan timbul secara bersamaan. Dalam penelitian ini, distribusi dan perilaku gaya-gaya tersebut dianalisis dengan metode alih beban dan azas tegangan lateral tanah. Data yang digunakan dalam analisis diambil dari beberapa bangunan gedung di Jakarta. Hasil analisis menunjukkan bahwa fundasi tiang akan memikul sebagian besar beban interaksi, sedangkan tekanan lateral dan tegangan geser pada dinding basement sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah, dan konfigurasi tiang dan basement.

Kata-kata kunci : *basement, beban gempa, distribusi beban, gaya gesek dinding, gaya lateral tiang, gaya normal dinding, interaksi dinamik.*

Abstract

Under earthquake induced dynamic soil-pile-basement structure interactions, simultaneous pile lateral, wall frictional, and wall normal forces will occur. This research investigated the distribution and behavior of such forces using the load transfer method as well as the classical lateral earth pressure principles. Data from typical buildings in Jakarta was used in the analysis. The results show that the pile foundations system carries a major part of the interaction forces, while reactions for wall frictional and normal forces are largely dependent on the soil conditions, pile system and basement configurations.

Keywords : *basement, dynamic interaction, earthquake load, load distribution, pile lateral force, wall normal force, wall frictional force.*

1. Pendahuluan

Interaksi tanah-fundasi-struktur saat terjadinya gempa pada suatu struktur bangunan gedung merupakan salah satu faktor yang amat penting dalam analisis rekayasa gempa. Dalam pengetahuan *state of the art*, analisis dilakukan dengan metode langsung (*direct method*), atau dengan metode multistep (*multistep method*). Secara rasional, beban gempa pada sistem fundasi akan secara partial dipikul oleh sistem fundasi tiang, oleh tekanan normal pada dinding yang tegak lurus arah beban, dan sebagian lagi oleh gesekan pada bidang singgung sejajar gaya gempa. Umumnya, dalam praktek rekayasa fundasi bangunan gedung, demi keamanan, seluruh beban lateral akibat beban gempa ini dipikulkan atau pada sistem fundasi tiang saja, atau pada tahanan reaksi normal pada dinding basement saja. Dukungan dari gesekan tanah pada sisi dinding basement lazimnya tidak disertakan. Biasanya,

tinjauan ini cukup memadai dari sudut pandang daya dukung fundasi tiang dan dinding basement.

Bilamana struktur bangunan yang ditinjau mempunyai basement yang relatif besar serta jumlah tiang fundasi yang banyak, asumsi di atas akan mengakibatkan suatu pemborosan yang mungkin dapat dicegah. Dalam hal ini, diperlukan suatu rincian yang lebih teliti mengenai distribusi beban interaksi tersebut ke masing-masing fundasi tiang, gaya tekanan normal dinding, dan gaya gesekan dinding samping. Rincian ini diperlukan baik dalam analisis metode langsung, serta dalam analisis multistep, baik dalam analisis interaksi inersial maupun dalam analisis interaksi kinematik.

Sejak awal perkembangan riset analisis interaksi tanah struktur sekitar 30 tahun yang lalu (Jennings dan Bielak, 1973; Veletsos dan Meek, 1974; Bielak, 1975; Roesset, 1980; Luco, 1982; Wolf, 1985; Ciampoli dan

1) Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil ITB

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada tanggal 9 Januari 2003 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 13 Januari 2003–7 Februari 2003. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 10 Februari 2003 hingga 20 Februari 2003.

Pinto, 1995; Gazetas dan Mylonakis, 1998; Stewart, Seed dan Fenves, 1999; serta Mylonakis dan Gazetas, 2000), cukup banyak metode analisis yang dikembangkan. Semua metode yang ada berlandaskan metode elemen hingga dan/atau batas, atau pegas ekuivalen yang mewakili media tanah yang ada. Pegas ekuivalen yang digunakan sebagai model fondasi tiang dalam analisis seyogianya harus mempunyai karakteristik yang konsisten dengan apa yang diyakini dalam praktek rekayasa fondasi (misalnya, metode alih beban, *load transfer method*), sedangkan tekanan lateral normal pada dinding basement harus tunduk pada kaidah klasik untuk tekanan lateral di dalam mekanika tanah. Toha (1994) mendapatkan bahwa model dasar elemen hingga umumnya kurang mampu memberikan perilaku beban-deformasi (*load-deformation*) yang konsisten terhadap pengamatan yang mendasari metode alih beban pada fondasi tiang. Dalam konteks rakit-bertiang (*piled-raft*), ketidaksempurnaan ini diatasi oleh Sengara (2001) dengan mengadakan elemen antara (*interface element*).

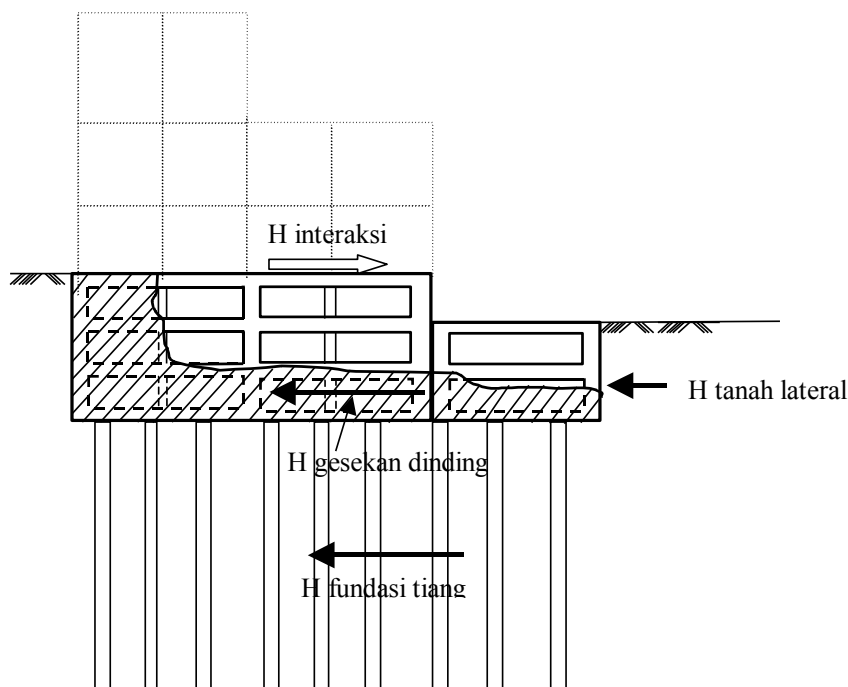
Dalam penelitian yang dipaparkan di sini, sistem fondasi yang terdiri dari dinding basement, fondasi tiang dan tanah di sekitarnya dimodel dengan menggunakan azas yang umum berlaku pada metode alih beban untuk tegangan tanah lateral, dan adaptasi khusus pada alih beban untuk sisi basement yang sejajar arah gaya interaksi. Model ini seyogianya lebih konsisten terhadap perilaku tanah, dibandingkan

model numerik lainnya yang dikembangkan dari konsep elemen padat (*solid element*). Kemudian, model yang digunakan diterapkan pada beberapa data tipikal yang dijumpai di Jakarta untuk mendapatkan gambaran umum mengenai distribusi beban interaksi lateral pada sistem fondasi seperti ini.

2. Deskripsi Model

Bilamana suatu sistem fondasi bangunan gedung berinteraksi dinamik dengan struktur atas dan tanah di sekelilingnya, beban interaksi yang timbul, baik yang didapat dari suatu analisis langsung maupun analisis multilangkah, akan bekerja pada semua elemen fondasi. Seperti terlihat pada ilustrasi dalam Gambar 1, pengaruh tersebut akan didistribusikan sebagai gaya lateral pada sistem fondasi tiang, gaya normal akibat tekanan tanah pada dinding basement yang tegak lurus arah gaya, dan gaya akibat tahanan geser dari tanah yang ada pada dinding sisi samping dan bawah basement. Karena sulit menjamin sempurnanya bidang kontak antara plat dasar basement dan tanah di bawahnya, komponen tahanan geser pada plat dasar basement umumnya diabaikan.

Masing-masing komponen pengaruh beban interaksi ini dimodelkan menggunakan azas yang umumnya sudah dikenal dalam rekayasa geoteknik, khususnya yang berhubungan dengan teori tekanan tanah lateral klasik dan metode alih beban. Uraian ini disampaikan berikut ini.



Gambar 1. Interaksi tanah-tiang-basement

2.1 Tekanan tanah lateral

Cukup banyak model tekanan tanah lateral dinamik yang sering digunakan dalam analisis rekayasa geoteknik gempa. Model dasar yang dikenalkan oleh Woods (1973), serta yang lebih mutakhir dari Wu (1994), dan Wu dan Finn (1996) sudah cukup banyak diterapkan dalam kasus praktek rekayasa fondasi di Indonesia (Toha, 1998; dan Sengara, 2002). Model-model ini menggunakan elemen padat dan konsep elastik linier. Dalam mendapatkan besarnya dan distribusi gaya lateral normal pada dinding basement tanpa ada interaksi dengan fondasi tiang dan gesekan sisi dinding, model-model ini memberikan hasil yang memadai seperti yang telah ditunjukkan dalam beberapa data pengukuran. Namun, dalam suatu interaksi yang menyertakan fondasi tiang, dan juga gesekan pada dinding basement, model-model tersebut tidak akan memadai, dan akan sangat sulit dikalibrasi melalui pengukuran fisik.

Atas dasar pertimbangan di atas, dalam penelitian ini, digunakan hubungan tegangan-regangan tanah lateral yang mengikuti konsep yang sudah dikenal dalam mekanika tanah klasik (Terzaghi, 1954) seperti tergambar pada Gambar 2. Konsep ini berlaku untuk dinding kantilever, dan batasan pencapaian kondisi batas aktif dan pasif dapat ditemukan dalam banyak rujukan, salah satu misalnya, CGS (1992), yang disampaikan dalam Tabel 1. Bilamana terjadi translasi dinding tanpa rotasi, Wu (1970) mengusulkan batasan yang sedikit berbeda, yang juga disampaikan dalam Tabel 1. Untuk menetapkan koefisien tekanan tanah lateral *at rest*, K_o , digunakan hasil studi dari Mayne dan Kulhawy (1982) atas 171 pengujian tanah pasir dan lempung di laboratorium sebagai berikut:

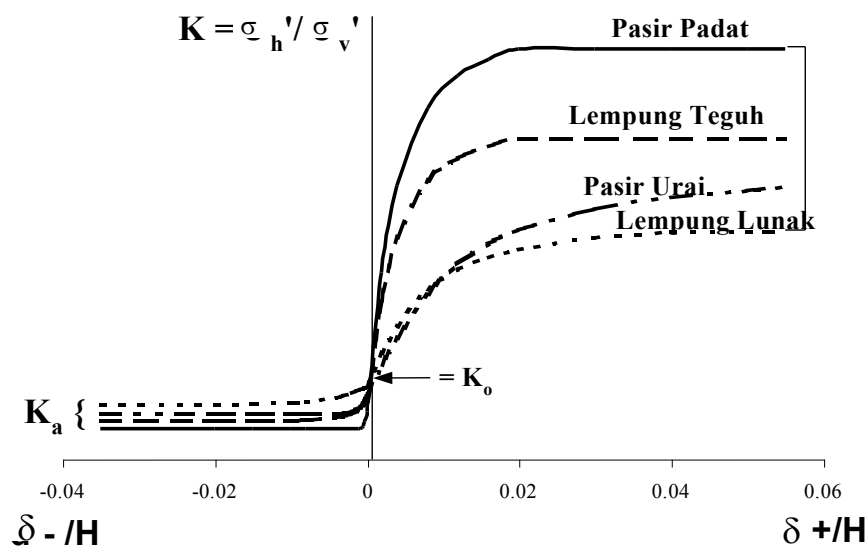
$$K_o = (1 - \sin \phi') \left[\frac{OCR}{OCR_{\max}^{(1-\sin \phi')}} + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{OCR}{OCR_{\max}} \right) \right] \quad (1)$$

di mana ϕ' adalah sudut geser dalam tanah, dan OCR adalah *over consolidation ratio*.

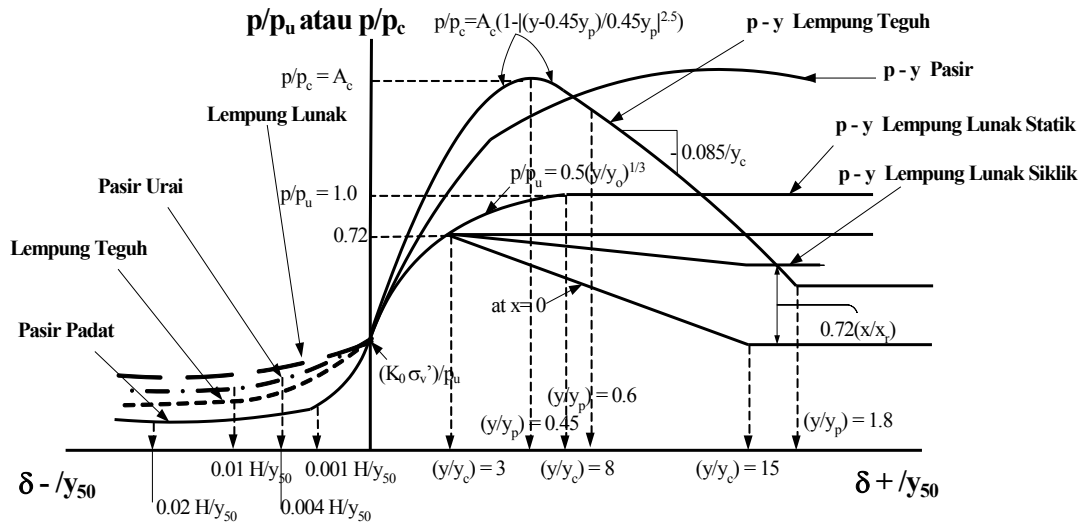
Tabel 1. Deformasi batas

Batas Tekanan lateral	Lempung		Pasir	
	Lunak	Teguh	Urai	Padat
Aktif	0.004* - 0.02 H	0.004* - 0.01 H	0.001* - 0.004 H	0.001 H
Pasif				
Tek. Tanah lateral	0.040 H	0.020 H	0.05* - 0.060 H	0.05* - 0.020 H
Metode p-y, statik	0.200 H	0.014 - 0.025 H	0.017 - 0.038 H	0.017 - 0.038 H
siklik	0.075 H	0.006 - 0.010 H	0.017 - 0.038 H	0.017 - 0.038 H

*) Menurut Wu (1970), untuk translasi lateral tanpa rotasi



Gambar 2. Koefisien tegangan tanah lateral



Gambar 3. Korelasi tegangan normal-regangan berdasarkan metode alih beban

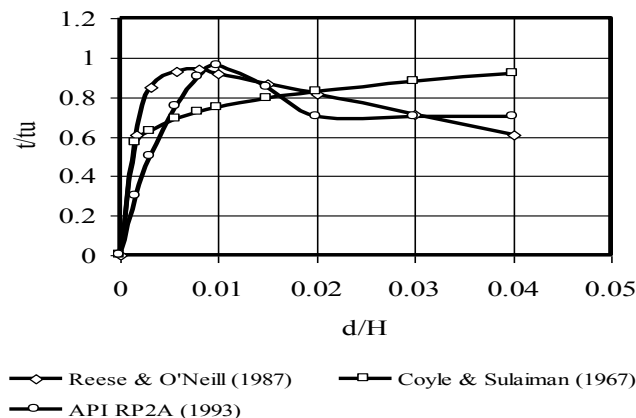
Sesuai uraian di atas, data pengukuran untuk tekanan lateral pada dinding akibat interaksi dinamik masih langka. Atas pertimbangan tersebut, dalam penelitian ini dipilih penggunaan basis data (*data base*) dari metode alih beban yang jumlahnya jauh lebih banyak. Kurva tegangan-regangan yang dipakai disesuaikan dengan mengadaptasi batasan-batasan yang didapatkan pada kurva $p-y$ (Cox, et al, 1974; Matlock, 1970; Reese, Cox dan Koop, 1974; serta Reese, Cox dan Koop, 1975) untuk fondasi tiang, seperti yang dicantumkan dalam Tabel 1 dan Gambar 3. Dalam penggunaan penelitian ini, diameter atau lebar tiang fondasi diganti dengan tinggi dinding basement, H .

2.2 Tahanan gesek tanah samping

Pada sisi dinding tepi basement yang bersinggungan dengan tanah, akan timbul tegangan geser dari tahanan gesek tanah akibat adanya interaksi antara tanah dengan dinding tepi basement tersebut. Sampai dengan saat penulisan makalah ini, belum ada data pengukuran ataupun model empirik yang dapat

langsung diterapkan pada konfigurasi dinding tepi-tanah seperti ini. Dalam penelitian ini, kurva $t-z$ yang umum digunakan dalam analisis metode alih beban diadaptasi dengan menganggap dinding basement sebagai sebuah tiang yang terletak horizontal dalam tanah. Tentunya, pendekatan masih perlu didukung dengan pengujian lapangan atau laboratorium yang lebih lanjut.

Dalam penelitian ini, untuk tanah lempung, dipilih data $t-z$ dari Reese dan O'Neill (1987). Sedangkan untuk tanah pasir, dapat digunakan data dari Coyle dan Sulaiman (1967), dengan menggunakan beberapa penyesuaian, karena data tersebut diperoleh untuk tiang yang dipancang ke dalam pasir. Bilamana tanah di samping dinding basement dipadatkan dengan baik, maka kurva $t-z$ dapat disesuaikan sehingga lebih menyerupai rekomendasi API RP2A (1993). Dengan mengadaptasi data $t-z$ yang ada, serta mengambil tinggi dinding basement, H , sebagai pengganti diameter tiang, kurva tahanan gesek tanah-deformasi yang didapat adalah seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Adaptasi dari metode alih beban untuk korelasi tegangan geser-regangan dinding

2.3 Tahanan lateral fundasi tiang

Model beban-deformasi untuk sistem fundasi tiang dalam penelitian ini diambil dari metode p - y yang sudah sangat dikenal. Untuk ini digunakan kurva p - y dari Cox, et al (1974); Matlock (1970); Reese, Cox dan Koop (1974); Reese, Cox dan Koop (1975); Reese dan Welch (1975); Welch dan Reese (1972). Reduksi atas p dan y (p - y multipliers) dalam kurva p - y yang akan digunakan dapat ditetapkan sesuai Dunnavant dan O'Neill (1987), Poulos dan Davis (1980), serta Reese, Wang, Awoshika, dan Lam (1994). Dalam analisis yang dilakukan, kurva p - y yang dipakai terlebih dahulu dikalibrasi dengan beberapa hasil uji beban; lalu secara serentak disesuaikan terhadap kon-

disi penjepitan masing-masing tiang pada dasar basement, dan diperhitungkan terhadap interaksi kelompok.

3. Data Bangunan

Data bangunan gedung yang dipakai dalam penelitian ini diambil dari data perencanaan beberapa gedung tinggi dengan basement, yang dikumpulkan dari arsip TPKB DKI (1997-2002). Data yang digunakan tercantum pada Tabel 2. Dapat dilihat bahwa gedung yang dipilih mempunyai cakupan luas dan kedalaman basement yang cukup bervariasi. Dalam analisis, bentuk basement disederhanakan menjadi persegi panjang ekuivalen dengan panjang dan lebar konstan. Jenis,

Tabel 2. Data gedung

Deskripsi		Gedung				
		Plaza Mangga Dua Jl. G. Sahari	WTC Mangga Dua Jl. G. Sahari	Kav. E 33 Mega Kuningan	Graha Niaga-2 Jl. Sudirman	ITC Kuningan Jl. Dr. Satrio
Data Basement						
1	Klasifikasi tanah (USCS)	CH	CH	CH	CL/ML	MH
2	Konsistensi	lunak	lunak	sedang	sedang	sedang
3	ϕ (°)				12° - 25°	15° - 19°
4	c_u (kPa)	15	1-5	30	30	4 - 20
5	c' (kPa)					4 - 7
6	Kurva gesekan dinding	1)	1)	1)	1)	1)
7	Kurva tekanan lateral	2)	2)	2)	2)	2)
8	Panjang basement (m)	256	224	102	90	113
9	Lebar basement (m)	128	72	96	90	57.6
10	Tinggi basement (m)	9.4	4.55	3.5	17.4	14.05
11	Gaya lateral gempa (kN)		81760	8950 tower 6970 podium	41070	40840
Fundasi Tiang:						
1	Klasifikasi tanah (USCS)	CL	CL	MH/ML	ML	MH
2	Konsistensi	lunak	lunak	sedang/teguh	teguh	teguh
3	ϕ (°)				13°-27°	
4	c_u (kPa)	15	15	102	150	125
5	Jumlah Tiang	2045	2318	226+132+222	186+264	1454
6	Konfigurasi	terdistribusi	terdistribusi	terdistribusi	terdistribusi	terdistribusi
7	Jenis Tiang	Pancang/PC	Pancang/PC	Pancang/PC	Bor	Pancang/PC
8	Diameter/lebar tiang (cm)	45	45	50, 45, 40	80, 100	45
9	Panjang tiang (m)		13.5	5.5-12	25-30	11.5 - 14
10	Kurva p-y	3)	3)	3) + 4)	4)	4)
11	Reduksi kelompok	0.4	0.38-0.60	0.4	0.4	0.4

- 1) Reese dan O'Neill (1987)
- 2) Matlock (1970) + Terzaghi (1954)
- 3) Matlock (1970)
- 4) Reese, Cox and Koop (1975)

jumlah dan panjang tiang berkisar dari tiang bor ke tiang pancang, berjumlah ratusan sampai ribuan, dan panjang tiang dari hanya beberapa sampai puluhan meter. Tanah pada bagian basement umumnya lempung kelanauan, dengan konsistensi lunak sampai sedang. Pada bagian tiang, tanah umumnya juga berupa lempung kelanauan, dengan konsistensi sedang sampai teguh. OCR tanah lempung di Jakarta umumnya berkisar dari 1.0 sampai sedikit di atasnya. Data tanah lainnya, seperti c_u , c' dan ϕ' , kohesi niralir, kohesi efektif dan sudut geser dalam efektif, sedapat mungkin mengikuti yang diambil oleh perencana yang bersangkutan.

4. Rincian Metode Analisis Data

Dari data yang terkumpul, dapat dilihat bahwa lapisan tanah yang ada umumnya adalah lapisan lempung kelanauan (CH, CL, MH dan ML) dengan konsistensi lunak sampai teguh. Karena itu, yang ditampilkan di sini hanyalah korelasi t - y dan p - y untuk tanah kelempungan, dan karena peninjauan dibatasi pada beban gempa, yang diambil hanya korelasi untuk beban siklik. Prinsip sederhana ini dapat dengan mudah diterapkan bilamana harus digunakan jenis tanah dan pembebanan yang lain.

4.1 Gaya lateral pada dinding

Tekanan lateral aktif yang terjadi pada dinding akan mengikuti teori tekanan tanah lateral Terzaghi (1954). Bila digunakan batasan menurut CGS (1992) untuk tanah lempung lunak sampai teguh, koefisien tekanan tanah lateral, K_{HA} dapat disederhanakan menjadi:

$$K_{HA} = K_A + (K_O - K_A) \frac{(\epsilon - \epsilon_{ya})^2}{\epsilon_{ya}^2} \quad (2)$$

di mana K_A adalah koefisien tekanan tanah lateral aktif menurut teori Rankine (1857), K_O adalah koefisien tekanan lateral *at rest*, yang dapat diperoleh dari Persamaan 1 (Mayne dan Kulhawy, 1982), dan ϵ_{ya} adalah regangan saat mana K_A terjadi, dan ϵ adalah regangan terkait.

Tekanan lateral pasif yang terjadi pada dinding diambil dari nilai terkecil di antara tekanan tanah lateral sesuai metode p - y , daya dukung fundasi dalam, atau tekanan lateral pasif dari teori klasik Rankine (1857).

Untuk jenis tanah lempung kelanauan dalam penelitian ini, kurva yang tercantum dalam Gambar 3 dapat digabungkan dengan Persamaan 2 sehingga didapat kurva lengkap untuk analisis. Parameter-parameter dalam Gambar 3, khususnya yang digunakan pada penelitian ini, dapat dirinci sebagai berikut:

4.1.1 Lempung lunak (Matlock, 1970):

$$y_{50} = 2.5 \epsilon_{50} H \quad (3)$$

di mana $\epsilon_{50} = 0.020$ untuk lempung lunak, dan 0.010 untuk lempung sedang, dan H adalah tinggi basement.

Tekanan lateral batas p_u , diambil yang terkecil dari:

$$p_u = [3 + x + x] c_u H \quad (4a)$$

atau

$$p_u = 9 c_u H \quad (4b)$$

atau

$$p_u = \gamma' x H \tan^2(45^\circ + \phi'/2) + 2 c' H \tan(45^\circ + \phi'/2) \quad (4c)$$

di mana γ' adalah tegangan efektif rata-rata dari permukaan tanah sampai kedalaman yang ditinjau, c_u adalah kohesi niralir pada titik yang ditinjau, x adalah jarak titik yang ditinjau dari permukaan tanah, J adalah parameter empirik sebesar 0.5 untuk lempung lunak dan 0.25 untuk lempung sedang, ϕ' adalah sudut geser efektif dalam lempung, dan c' adalah kohesi efektif.

Kedalaman di mana terjadi transisi kurva, x_r , didapat dari:

$$x_r = 6 c_u H / (\gamma' H + J c_u) \quad (5)$$

4.1.2 Lempung teguh (Reese, Cox dan Koop, 1975):

$$y_{50} = \epsilon_{50} H \quad (6a)$$

$$y_p = 4.1 A_c y_{50} \quad (6b)$$

di mana $\epsilon_{50} = 0.007$ untuk $c_u = 5$ -100 kPa; $\epsilon_{50} = 0.005$ untuk $c_u = 100$ -200 kPa; dan $\epsilon_{50} = 0.004$ untuk $c_u = 200$ -400 kPa; A_c adalah koefisien yang berkisar secara parabolik antara 0.2 dan 0.3 untuk $x/H \leq 1.75$, dan bernilai konstan sebesar 0.3 untuk $x/H > 1.75$.

Untuk mendapatkan kemiringan bagian awal kurva p - y , besarnya k_x adalah 55,500; 111,000; dan 222,000 kN/m³, untuk kohesi niralir rata-rata, c_u , yang didapat dari uji triaxial UU, berturut-turut sebesar 50-100, 100-200 dan 200-400 kPa.

Tekanan lateral batas, p_c , diambil yang terkecil dari:

$$p_c = 2 c_u H + \gamma' H x + 2.83 c_u x \quad (7a)$$

atau

$$p_c = 11 c_u H \quad (7b)$$

atau

$$p_c = \gamma' \times H \tan^2(45^\circ + \phi'/2) + 2 c' H \tan(45^\circ + \phi'/2) \quad (7c)$$

di mana c_u adalah kohesi niralir rata-rata untuk seluruh lapisan dari permukaan tanah sampai kedalaman yang ditinjau,

4.2 Gaya gesek pada dinding

Gaya gesek pada dinding diperkirakan dengan menggunakan data kurva t - z menurut Reese dan O'Neill (1987), seperti yang disampaikan pada Gambar 4. Meskipun data ini diperuntukkan untuk tiang bor dalam lapisan lempung, konsep dasarnya tetap sama. Perbedaan besarnya diameter tiang bor dengan tinggi dinding basement, serta orientasi tegangan-tegangan yang ada memang diperkirakan akan membawa dampak terhadap koefisien dalam kurva yang digunakan. Dampak ini belum diperhitungkan dalam penelitian ini.

Data Reese dan O'Neill (1987) digunakan dalam bentuk polynomial berikut dalam penelitian ini:

untuk $(100 \delta/H) \leq 0.8$:

$$\left(\frac{t}{t_u}\right) = 4.72 \bar{\delta} - 3.61 \bar{\delta}^2 - 20.62 \bar{\delta}^3 + 45.68 \bar{\delta}^4 - 26.49 \bar{\delta}^5 \quad (8a)$$

untuk $(100 \delta/H) > 0.8$:

$$\left(\frac{t}{t_u}\right) = -0.1 \bar{\delta} + 1.02 \quad (8b)$$

di mana $\bar{\delta}$ = dan δ adalah deformasi horizontal yang terjadi pada titik yang ditinjau.

Atas pertimbangan kurang akuratnya model dengan data dari kurva t - z tiang bor dalam lempung, serta pertimbangan bahwa beban yang bekerja adalah siklik, dilakukan analisis terpisah dalam penelitian ini, yakni menggunakan kurva yang dibuat lebih lunak dengan mengalikan $(100 \delta/B)$ dengan suatu faktor pengali. Batas atas kurva paling kaku dalam penelitian ini diperkirakan dari kurva t - z Coyle dan Sulaiman (1967) untuk tiang pancang baja dalam pasir, sebagai yang terlihat dalam Gambar 4, dan persamaan berikut:

untuk $(\delta/H) \leq 0.07$:

$$\left(\frac{t}{t_{\max}}\right) = 1.4902 \left(\frac{\delta}{H}\right)^{0.15} \quad (9a)$$

dan $(\delta/H) > 0.07$:

$$\left(\frac{t}{t_{\max}}\right) = 1.0 \quad (9b)$$

4.3 Gaya lateral pada sistem tiang fondasi

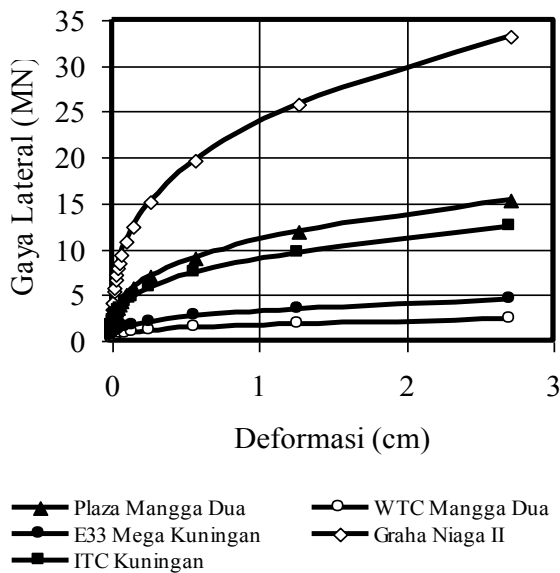
Gaya lateral pada sistem tiang fondasi diperoleh dari penggunaan kurva p - y untuk tanah lempung lunak sampai sedang (Matlock, 1970, dan Reese, Cox, dan Koop, 1975) dengan pembebanan siklik. Karena hasil uji beban lateral statik di lapangan umumnya memberikan deformasi yang berbeda, kurva p - y yang digunakan dalam penelitian ini dikalibrasi terlebih dahulu terhadap hasil uji tersebut. Proses itu dilakukan dengan menyesuaikan parameter-parameter tanah di dalam analisis deformasi lateral tiang berkepala bebas (*free head*). Selanjutnya faktor reduksi akibat interaksi kelompok dan penjepitan pada plat basement dimasukkan dalam analisis dengan program LPILE (Reese dan Wang, 1989), untuk mendapatkan kurva beban-deformasi untuk setiap tiang yang ditinjau. Dari data yang ada, faktor reduksi akibat interaksi kelompok paling teliti dianalisis pada kasus WTC Mangga Dua, yakni menggunakan cara Poulos dan Davis (1980). Untuk WTC Mangga Dua faktor reduksi kelompok yang terendah adalah 0.38. Karena jumlah tiang yang ditinjau dalam penelitian ini sangat banyak, faktor reduksi yang digunakan untuk seluruh analisis adalah 0.4, hampir sama dengan yang dipakai di WTC Mangga Dua.

5 Hasil Analisis

Dengan data dari beberapa kasus yang dianggap cukup mewakili kondisi yang umumnya dijumpai di Jakarta, dilakukan analisis parametrik. Parameter yang digunakan dalam analisis sudah disampaikan dalam Tabel 1. Hasil analisis diulas berikut ini.

5.1 Gaya lateral dinding

Gaya lateral yang terjadi pada dinding basement disebabkan oleh tekanan lateral akibat interaksi antara basement dengan tanah saat terjadi gempa. Ikhtisar gaya lateral untuk kasus yang ditinjau, disampaikan pada Gambar 5. Dalam proses analisis, cakupan deformasi dinding yang digunakan disesuaikan dengan prakiraan deformasi lateral yang akan terjadi pada keseluruhan sistem fondasi. Gaya-gaya yang ditampilkan pada Gambar 5 bekerja pada bidang yang tegak lurus arah gaya interaksi.



Gambar 5. Gaya lateral pada dinding

Nilai yang dicapai untuk gaya lateral dinding ini sangat bervariasi. Hal ini sangat besar dipengaruhi oleh lebar dan kedalaman basement yang sangat bervariasi, serta kekakuan sistem fundasi tiang yang ada. Seperti akan disampaikan nanti, hal ini berarti bahwa besarnya kontribusi komponen ini di dalam interaksi harus ditetapkan dengan mempertimbangkan secara lengkap dimensi basement yang ada, relatif terhadap sistem fundasi tiang.

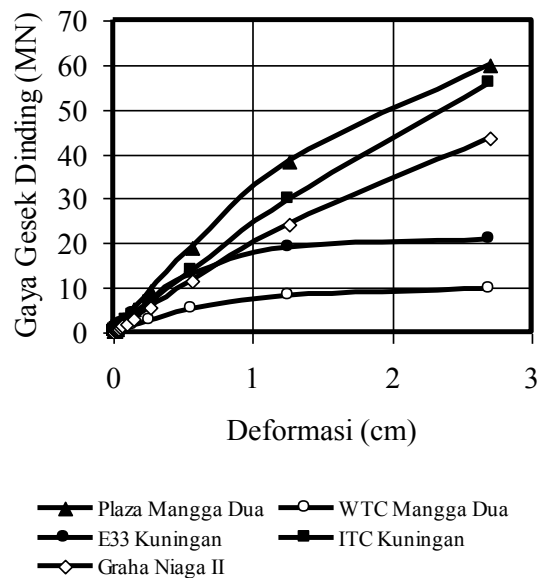
Tekanan lateral yang timbul, lazimnya ditentukan sesuai dengan kaidah kurva p - y atau tekanan lateral batas pasif dari Rankine (1857). Tidak satupun kasus yang ditinjau mencapai tekanan batas berdasarkan Persamaan 4b atau 7b. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya lebar basement relatif terhadap tinggi dindingnya. Dalam batasan deformasi lateral sistem fundasi tiang, tekanan lateral batas dicapai dari kurva p - y pada kasus WTC Mangga Dua dan ITC Kuningan; sedangkan pada kasus Plaza Mangga Dua, Gedung E33 Mega Kuningan dan Graha Niaga II, tekanan lateral batas dikontrol oleh tekanan pasif Rankine (1857). Di sini juga tidak dapat dipastikan apakah pengaruhnya jenis tanah cukup dominan, karena baik pada kelompok pertama maupun pada kelompok kedua, terdapat jenis tanah lempung dengan konsistensi lempung lunak sampai sedang. Pada kasus Graha Niaga II, karena data tanah yang ada mengindikasikan bahwa lempung yang ada adalah lempung lunak sampai sedang, dilakukan analisis dengan pemakaian kurva p - y untuk lempung teguh. Hasil yang didapat

menunjukkan bahwa pemilihan nilai k_x , yakni modulus untuk bagian awal kurva p - y untuk lempung teguh, akan sangat mempengaruhi karakteristik kurva yang didapat. Untuk kasus yang ditinjau, pada deformasi yang sangat rendah, tekanan yang didapat dengan menggunakan k_x yang dianjurkan akan lebih kecil dari apa yang didapat dari kasus lempung lunak. Karena itu, pemilihan k_x harus dilakukan dengan cermat.

Seluruh deformasi lateral yang ditinjau dalam kasus yang ada, masih jauh di bawah batas $3 y_{50}$ untuk lempung lunak atau A_{cy50} untuk lempung teguh. Dengan demikian kurva p - y yang terpakai dalam analisis adalah suatu kurva sederhana, yakni berbentuk fungsi ax^b dan/atau linier. Dapat diharapkan bahwa pengukuran lapangan untuk mendapatkan parameter kurva p - y untuk dinding basement menjadi lebih sederhana.

5.2 Gaya gesekan dinding

Hasil analisis untuk gaya gesekan dinding yang timbul saat ada interaksi antara basement dan tanah di sekelilingnya disampaikan di Gambar 6. Serupa halnya dengan beban lateral, besarnya gaya ini sangat ditentukan oleh konfigurasi dinding basement serta sistem fundasi tiang yang ada. Sama halnya dengan keadaan untuk gaya lateral dinding, tegangan yang terjadi untuk cakupan deformasi lateral tiang yang ada, masih jauh dari kuat batas.

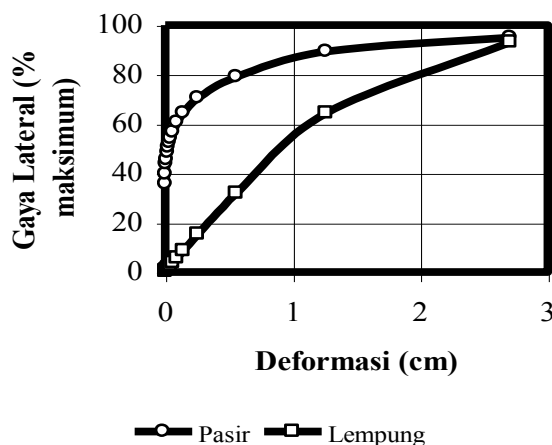


Gambar 6. Gesekan pada dinding

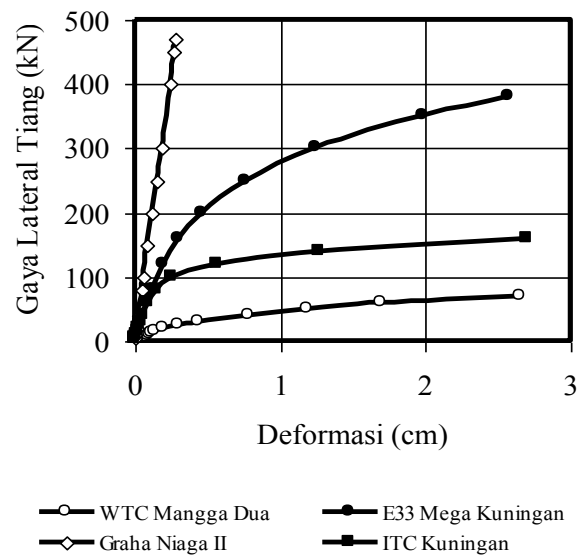
Dalam penelitian ini, data yang dimiliki untuk melakukan analisis gaya-deformasi gesekan pada dinding relatif sangat minim dibandingkan dengan yang tersedia untuk gaya akibat tekanan normal dinding dan deformasi lateral sistem fondasi tiang. Oleh karena itu, tingkat ketidakpastian di sini cukup tinggi. Atas pertimbangan itu, untuk Graha Niaga II dilakukan analisis gaya gesek dengan mengadaptasi kurva $t-z$ untuk pasir sebagai pembanding. Hasil yang didapat, seperti disampaikan dalam Gambar 7, menunjukkan bahwa tegangan geser yang timbul umumnya relatif konstan terhadap deformasi, dan tegangan tersebut hanya mencapai 60 sampai 70 % dari kuat geser teoritik. Besarnya gaya yang diperoleh tidak berbeda jauh dengan gaya maksimum yang diperoleh dengan model untuk tanah lempung. Perbedaannya, gaya maximum pada model pasir jauh lebih cepat tercapai dibandingkan pada model lempung. Implikasinya, bilamana keadaan sebenarnya memberikan perilaku beban gesekan dinding-deformasi yang lebih kaku, maka pada deformasi rendah, gaya gesek yang terjadi akan jauh lebih besar. Kecenderungan ini masih perlu dibuktikan melalui percobaan skala besar di lapangan.

5.3 Gaya lateral sistem fondasi tiang

Hasil analisis deformasi lateral sistem fondasi tiang sudah dapat diperkirakan sebelumnya, karena baik metode maupun data pendukung yang ada sudah paling lengkap dan umum diketahui. Untuk kasus yang ditinjau di sini, korelasi antara gaya lateral dan deformasi sistem fondasi tiang dengan konfigurasi kelompok (artinya reduksi interaksi kelompok disertakan) serta sambungan tiang dengan struktur basement dalam kondisi terjepit, disampaikan dalam Gambar 8.



Gambar 7. Tegangan geser sisi dinding untuk pasir dan lempung di Niaga II

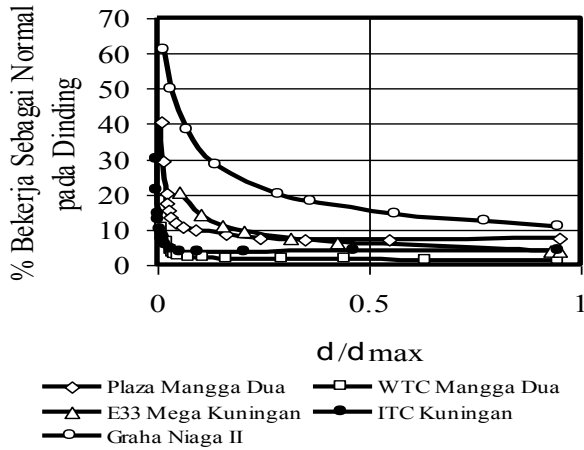


Gambar 8. Gaya lateral fondasi tiang

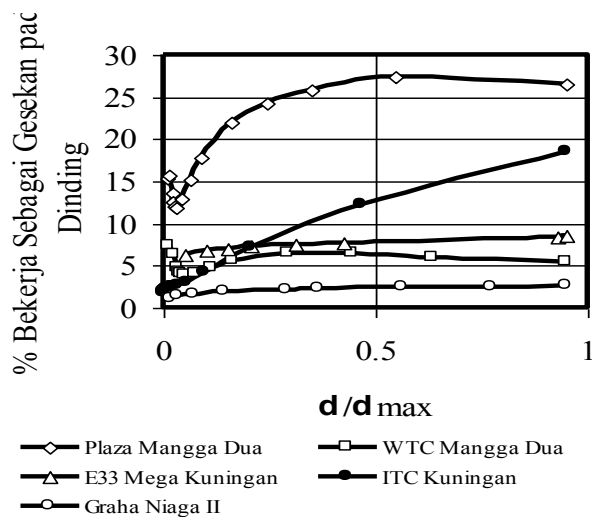
Dalam proses kalibrasi kurva $p-y$ untuk fondasi tiang, didapat beberapa produk sampingan di luar informasi yang dicari dalam penelitian ini. Hasil uji beban beberapa lokasi di Jakarta umumnya menunjukkan bahwa nilai ε_{50} untuk kasus yang ditinjau (bisa diharapkan mewakili Jakarta) lebih kecil dari yang dianjurkan Matlock (1970) dan Reese et al (1975). Ini berarti bahwa kurva $p-y$ di Jakarta cenderung lebih kaku dari apa yang umumnya ditetapkan dalam literatur. Selanjutnya, juga dalam proses analisis, terlihat bahwa untuk cakupan jenis tanah, beban lateral dan fondasi tiang yang ada, hasil *back analysis* yang kemudian dikombinasi dengan pengaruh jepitan kepala tiang pada struktur basement dan pengaruh beban siklik, akan menghasilkan deformasi yang lebih kecil, yakni sekitar 33 – 75 %, dari apa yang dibaca saat uji beban statik dengan ujung tiang yang bebas.

5.4 Distribusi gaya interaksi

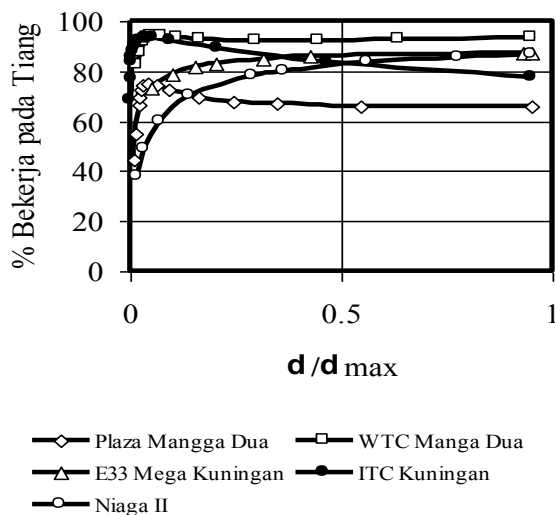
Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan gambaran tentang distribusi beban lateral pada interaksi tanah-fondasi-basement akibat gempa. Untuk itu telah dilakukan analisis atas beberapa data tipikal bangunan gedung yang ada di Jakarta. Hasil analisis disajikan dalam Gambar 9. Hasil-hasil yang disampaikan dalam Gambar 9 adalah untuk kasus gaya interaksi yang sejajar dengan arah panjang tapak basement. Semua hasil analisis menunjukkan bahwa interaksi yang erat terjadi pada tingkat beban yang rendah. Pada tingkat beban yang lebih tinggi, semakin besar bagian dari gaya interaksi akan dilimpahkan kepada sistem fondasi tiang.



Gambar 9a. Rasio gaya lateral dinding terhadap total



Gambar 9b. Rasio gaya gesekan dinding terhadap total



Gambar 9c. Rasio gaya lateral fondasi tiang terhadap total

Secara umum, pada beban interaksi sebesar gaya inersia statik ekuivalen dari struktur atas, lebih dari 70 % akan dipikul oleh sistem fundasi tiang melalui kekakuan lateralnya. Distribusi ini juga sangat dipengaruhi oleh banyak parameter, antara lain dimensi basement, jumlah dan konfigurasi fundasi tiang, serta kuat geser tanah pada kedalaman basement dan bagian atas fundasi tiang. Dengan demikian, tidak dianjurkan untuk melakukan reduksi beban lateral rencana pada sistem fundasi tiang, bilamana tidak disertai dengan suatu analisis interaksi lengkap. Dalam hasil analisis, di WTC Mangga Dua, sistem fundasi tiang menyerap 93 % dari beban interaksi, sehingga reduksi beban rencana lateral dari beban geser dasar hanya sekitar 7 %. Untuk kasus bangunan lainnya, pada tingkat beban ijin dengan deformasi sebesar 0.625 cm (1/4 inch), kita dapat mengharapkan reduksi yang lebih besar dari 15 %.

Gaya geser antara tanah dan dinding basement yang sejajar arah gaya interaksi sangat dipengaruhi oleh luas bidang geser ini. Untuk kasus-kasus yang ditinjau, rasio gaya ini terhadap gaya total cukup besar untuk kasus Plaza Mangga Dua dan ITC Kuningan. Pada kedua kasus ini, luas bidang geser relatif besar karena dalamnya basement, dan kekakuan relatif sistem fundasi tiang agak lebih rendah, sehingga gaya geser mencapai di atas 20 % dari total. Untuk kasus yang lain, umumnya proporsi gaya geser ini kurang dari 5 %. Pada kasus Graha Niaga II. Meskipun kuat geser tanah di sekitar basement cukup tinggi, gaya interaksi lateral lebih banyak diserap melalui tekanan lateral dinding. Namun, untuk tidak mengeneralisasikan dan mencegah terjadinya salah pengertian, perlu diketahui bahwa data kurva $t-z$ yang dipakai, masih harus diverifikasi dengan uji beban skala penuh di lapangan.

Gaya normal akibat tekanan tanah lateral pada dinding basement yang tegak lurus terhadap gaya interaksi, merupakan komponen besar dari keseluruhan gaya bilamana tingkat deformasi masih rendah. Pada beban-beban awal, gaya normal ini dapat mencapai lebih dari 30 % beban lateral total, namun pada gaya interaksi sebesar dua kali beban rencana, proporsi gaya interaksi dalam bentuk gaya normal pada dinding selalu kurang dari 10 %. Proporsi gaya ini juga sangat dipengaruhi oleh perbandingan panjang dan lebar telapak basement.

Dari uraian di atas, dapat dilihat bahwa tidaklah berlebihan bilamana suatu sistem fundasi tiang pada bangunan gedung dibebani dengan seluruh beban lateral gempa. Namun sebaliknya, bilamana dinding basement yang tegak lurus arah beban menerima seluruh beban interaksi, reaksi yang timbul sangat berlebihan. Gaya geser pada dinding sisi basement hanya

mungkin menjadi besar, bilamana basement yang panjang ini terletak dalam suatu lapisan tanah yang mempunyai kuat geser yang lebih tinggi dari lapisan tanah di sekitar bagian atas tiang fondasi. Hal ini dapat dijumpai pada lokasi yang diurug dengan pasir dan dipadatkan dengan baik.

6. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang diperoleh, untuk suatu interaksi dinamik tanah-tiang-basement pada bangunan tinggi, beberapa kesimpulan dapat disampaikan sebagai berikut:

1. Sebagian besar gaya interaksi akan diterima oleh system fondasi tiang. Karena besarnya gaya yang diserap komponen lainnya sangat sensitif terhadap banyak parameter lain, tidak dianjurkan untuk melakukan reduksi beban lateral rencana pada system fondasi tiang, tanpa melakukan analisis interaksi lengkap.
2. Besarnya gaya interaksi dari tegangan geser sisi dinding basement dan yang dari tegangan normal dinding yang tegak lurus arah gaya interaksi, sangat besar dipengaruhi beberapa faktor seperti kuat geser tanah dan modulus deformasi tanah; dimensi, jumlah, dan kekakuan sistem fondasi tiang; serta dimensi basement. Masing-masing gaya ini tidak dapat ditetapkan tanpa memperhatikan komponen gaya lainnya.
3. Pada nilai beban interaksi yang rendah, proporsi yang dipikul oleh gesekan dan tegangan normal dinding cenderung lebih besar, dan secara berangsur akan berkurang dengan meningkatnya beban interaksi.
4. Untuk kasus yang ditinjau, umumnya beban lateral akibat tegangan normal pada dinding basement lebih kecil dari 30 % dari beban interaksi total. Ini berarti bahwa praktik pembebanan seluruh beban interaksi pada dinding basement sangatlah berlebihan. Juga, usaha peningkatan kekakuan lateral system melalui reaksi normal dinding hampir dapat dipastikan akan kurang efektif.
5. Karena hasil yang didapat selama penelitian ini cukup sensitif terhadap perilaku tegangan geser sisi dinding dan tegangan normal pada dinding, dianjurkan agar penelitian ini dilanjutkan dengan pengumpulan data pengukuran fisik perilaku tegangan tersebut dalam skala konfigurasi basement.

7. Ucapan Terima Kasih

Penulis makalah ini mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Tim Penasehat Konstruksi Bangunan, Badan Penasehat Teknis Perkotaan dan Bangunan, Pemda DKI, khususnya rekan-rekan dari Sekretariat, atas tersedianya data-data yang diperlukan untuk analisis penelitian ini. Penulis juga berterimakasih atas bantuan Ir. Adil Naibaho yang telah berjuang keras dalam menyelesaikan sebagian gambar-gambar dalam tulisan ini dalam waktu yang amat singkat.

Daftar Pustaka

- API RP2A, 1993, "*Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*", American Petroleum Institute.
- Bielak, J., 1975, "*Dynamic Behaviour of Structures with Embedded Foundations*", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3.
- CGS, 1992, "*Canadian Foundation Engineering Manual*", Edisi ke 3, Canadian Geotechnical Society.
- Ciampoli, M. dan Pinto, P. E., 1995, "*Effects of Soil-Structure Interaction on Inelastic Seismic Response of Bridge Piers*", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 5.
- Cox, W. R., Reese, L. C., and Grubbs, B. R., 1974, "*Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*", Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference.
- Coyle, H. M. dan Sulaiman, I. H., 1967, "*Skin Friction for Steel Piles in Sand*", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 93, No. SM6.
- Dunnivant, T. W. dan O'Neill, M. W., 1986, "*Evaluation of Design Oriented Methods for Analysis for Vertical Pile Groups Subjected to Lateral Load*", Numerical Methods in Offshore Piling, Institut Francais du Petrole, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Gazetas, G. dan Mylonakis, G., 1998, "*Seismic Soil-Structure Interaction: New Evidence and Emerging Issues*", Geotechnical Earthquake

- Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, P. Dakoulas, M. K. Yegian, dan R. D. Holtz (Editor), Vol. II.
- Jennings, P. C. dan Bielak, J., 1973, "Dynamics of Building-Soil Interaction," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 1.
- Luco, E., 1982, "Linear Soil-Structure Interaction: A Review," Earthquake Ground Motion and Effects on Structures, ASME, AMD Vol 53.
- Matlock, H., 1970, "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay," Proceedings of the 2nd Annual Offshore Technology Conference.
- Mayne, P. W. dan Kulhawy, F. H., 1982, "K₀-OCR Relationships in Soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. GT6.
- Mylonakis, G. dan Gazetas, G., 2000, "Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 3.
- Poulos, H. G. dan Davis, E. H., 1980, "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons.
- Rankine, W. J. M., 1857, "On Stability of Loose Earth," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 147.
- Reese, L. C., Cox, W. R. dan Koop, F. D., 1975, "Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay," *Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference*.
- Reese, L. C., Cox, W. R. dan Koop, F. D., 1974, "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", *Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference*.
- Reese, L.C. dan O'Neill, M. W., 1987, "Drilled shafts: Construction Procedures and Design Methods", *Report No. FHWA-HI-88-042*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Reese, L. C., Wang, S. T., 1989, "Documentation of Computer Program LPILE," ENSOFT.
- Reese, L. C., Wang, S. T., Awoshika, K., Lam, P. H. F., 1994, "Documentation of Computer Program GROUP Version 3.0: Analysis of A Group of Piles Subjected to Axial and Lateral Loading," ENSOFT.
- Reese, L. C. dan Welch, R. C., 1975, "Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 101, No. 7.
- Roesset, J. M., 1980, "A Review of Soil-Structure Interaction," Soil-structure interaction: The status of current analysis method and research, J.J. Johnson (Editor), Report Nos. NUREG/CR-1780 dan UCRL-53011, US Nuclear Regulatory Commission and Lawrence Livermore Laboratory.
- Sengara, I. W., Sukamta, D. dan Purba, A., 2001, "Analisis Tegangan-Deformasi Non-Linier Pondasi Gedung Amartapura Sebagai System Piled Raft", *Prosiding Seminar Pertemuan Ilmiah Tahunan Geoteknik V, Problema Geoteknik: Perkembangan dan Penanggulangannya*, HATTI.
- Sengara, I. W. dan Sumiarta, P., 2002, "Soil-Structure Interaction FE Analysis to Derive Seismic Design Lateral Load Distribution for Basement Wall in Clay," *Proceeding of International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management and Maintenance of Building Structures*, Bali.
- Stewart, J. P., Seed, R. B. dan Fenves, G. L., 1999, "Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. II: Empirical Findings," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1.
- Terzaghi, K., 1954, "Anchored Bulkheads," *Transactions ASCE*, Vol. 119.
- TPKB DKI, 1997-2002, "Arsip Dokumen Perencanaan Fundasi/Struktur Bawah. Tim Penasehat Konstruksi Bangunan", Badan Penasehat Teknis Perkotaan dan Bangunan, Pemda DKI.
- Toha, F. X., 1994, "Aspek Perencanaan Fundasi Tiang Bor Berdiameter Besar pada Jembatan Bentang Panjang", *Seminar Nasional Perancangan dan Pelaksanaan pada Jembatan Bentang Panjang*, HMS ITB.
- Toha, F. X., 1998, "Beban Gempa pada Konstruksi Basement," *Prosiding Seminar Geoteknik di*

Indonesia Menjelang Milenium ke-3, HATTI-ITB.

- Veletsos, A. S. dan Meek, J. W., 1974, "*Dynamic Behavior of Building-Foundation Systems*," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, No. 2.
- Welch, R. C. dan Reese, L. C., 1972, "*Laterally Loaded Behavior of Drilled Shafts* ", Research Report No. 3-5-65-89, conducted for Texas Highway Department and U.S. Department of Transportation, FHWA.
- Wolf, J. P., 1985, "*Seismic Soil-Structure Interaction*," Prentice Hall.
- Wood, J.H., 1973, "*Earthquake-Induced Soil Pressures on Structures*," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, California.
- Wu, G., 1994, "*Dynamic Soil-Structure Interaction: Pile Foundations and Retaining Structures*," Ph.D. Thesis, Univ. of British Columbia, Canada.
- Wu, G. dan Finn, W. D. L., 1996, "*Seismic Pressures Against Rigid Walls*", Analysis and design of retaining Structures against Earthquakes, Geotechnical STP No. 60, ASCE.
- Wu, T. H., 1976, "*Soil Mechanics*". Edisi ke 3, Alyn and Bacon.

