

SIGNIFIKANSI PERBEDAAN RESPON TIANG FONDASI ANTARA MODEL TERPISAH DAN SIMULTAN DALAM ANALISIS INTERAKSI STRUKTUR-TANAH: STUDI NUMERIK PADA GEDUNG C-D ITERA

Ayu Sinta Aprilia^{1*)}, Rahmat Kurniawan²⁾, Septian Hidayat³⁾, Ahmad Auliadi Y⁴⁾
E-mail : ayu.aprilia@si.itera.ac.id¹⁾, rahmat.kurniawan@si.itera.ac.id²⁾,
septian.21116062@student.itera.ac.id³⁾, ahmad.122210045@student.itera.ac.id⁴⁾

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi Sumatera

ABSTRAK

Fondasi tiang pada bangunan bertingkat berperan kritis dalam mentransfer beban struktur ke lapisan tanah yang lebih dalam dan kompeten. Analisis interaksi struktur-tanah (*Soil-Structure Interaction/SSI*) merupakan aspek fundamental dalam desain fondasi, terutama di Indonesia yang merupakan kawasan rawan gempa dengan karakteristik tanah yang beragam, mulai dari lempung lunak hingga lempung kaku. Dalam praktik rekayasa geoteknik, terdapat dua pendekatan analisis yang umum digunakan, yaitu model terpisah (*decoupled*) dan model simultan (*coupled*). Meskipun keduanya telah banyak diterapkan, signifikansi praktis dari perbedaan

respon yang dihasilkan kedua pendekatan tersebut belum banyak dikaji dalam konteks desain berbasis standar SNI. Penelitian ini menganalisis signifikansi perbedaan respon sistem fondasi tiang antara pendekatan model terpisah dan model simultan dalam analisis interaksi struktur-tanah. Studi numerik dilakukan pada Gedung C-D Institut Teknologi Sumatera yang merupakan bangunan 3 lantai dengan sistem fondasi tiang bor pada tanah lempung kaku. Analisis model terpisah menggunakan kombinasi *software* ETABS dan GROUP, sedangkan model simultan menggunakan ETABS terintegrasi dengan pemodelan *soil spring nonlinear* (p-y, t-z, dan q-z). Evaluasi dilakukan terhadap 10 konfigurasi *pilecap* dengan tiga kondisi pembebanan (statik, gempa nominal, gempa kuat) berdasarkan empat parameter utama: gaya aksial, momen lentur, gaya geser, dan defleksi lateral. Berbeda dengan studi sebelumnya yang hanya melaporkan selisih relatif, penelitian ini mengevaluasi signifikansi praktis menggunakan rasio pemanfaatan (*utilization ratio*). Hasil menunjukkan bahwa meskipun selisih relatif dapat mencapai ratusan persen pada parameter tertentu, perbedaan rasio pemanfaatan (ΔUR) umumnya berkisar 2-7% untuk konfigurasi *pilecap* sederhana dan 12-14% untuk *pilecap* multi-kolom. Kedua pendekatan menghasilkan desain yang memenuhi kriteria keamanan SNI 2847:2019 dan SNI 8460:2017. Pendekatan berbasis *utilization ratio* memberikan perspektif yang lebih bermakna dalam menilai signifikansi perbedaan metode analisis fondasi.

Kata kunci: interaksi struktur-tanah, fondasi tiang, model terpisah, model simultan, rasio pemanfaatan, studi numerik

ABSTRACT

Pile foundations in multi-story buildings play a critical role in transferring structural loads to deeper and more competent soil layers. Soil-Structure Interaction (SSI) analysis is a fundamental aspect of foundation design, particularly in Indonesia, which is an earthquake-prone region with diverse soil characteristics ranging from soft to stiff clay. In geotechnical engineering practice, two analysis approaches are commonly used: the decoupled model and the coupled model. Although both have been widely applied, the practical significance of the differences in responses generated by the two approaches has not been extensively studied within the context of SNI-based design standards. This study analyzes the significance of differences in pile foundation system response between decoupled and coupled modeling approaches in soil-structure interaction analysis. A numerical study was conducted on the C-D Building at Institut Teknologi Sumatera, a three-story structure supported by a bored pile foundation system in stiff clay soil. The decoupled analysis

employed a combination of ETABS and GROUP software, whereas the coupled model utilized ETABS integrated with nonlinear soil spring modeling (p - y , t - z , and q - z curves). The evaluation covered 10 pilecap configurations under three loading conditions (static, nominal earthquake, and strong earthquake) based on four key parameters: axial force, bending moment, shear force, and lateral deflection. Unlike previous studies that primarily reported relative differences, this research evaluates practical significance using the utilization ratio. The results indicate that while relative differences could reach hundreds of percent for specific parameters, the differences in utilization ratios (ΔUR) generally ranged from 2-7% for simple pilecap configurations and 12-14% for multi-column pilecaps. Both approaches yielded designs that satisfy the safety criteria of SNI 2847:2019 and SNI 8460:2017. The utilization ratio-based approach provides a more meaningful perspective for assessing the significance of differences in foundation analysis methods.

Keywords: soil-structure interaction, pile foundation, decoupled model, coupled model, utilization ratio, numerical study

1. PENDAHULUAN

Fondasi tiang merupakan elemen struktural kritis yang berfungsi mentransfer beban bangunan ke lapisan tanah yang lebih dalam dan kompeten. Pada bangunan bertingkat, perilaku fondasi tiang tidak dapat dianalisis secara independen dari struktur atasnya karena adanya interaksi kompleks antara tanah, fondasi, dan struktur (Mylonakis et al., 2006). Interaksi struktur-tanah (*Soil-Structure Interaction/SSI*) mengacu pada fenomena di mana respons struktur dipengaruhi oleh deformasi tanah pendukungnya, dan sebaliknya. Konsep ini pertama kali dikembangkan secara sistematis oleh Wolf (1985) yang meletakkan dasar teoretis untuk analisis dinamik sistem fondasi-struktur. Hokmabadi dan Fatahi (2016) menunjukkan bahwa pengaruh SSI menjadi signifikan ketika rasio kekakuan struktur terhadap tanah cukup besar, terutama pada tanah lunak hingga sedang, di mana pengabaian interaksi dapat menghasilkan desain yang tidak konservatif.

Dalam praktik rekayasa geoteknik, terdapat dua pendekatan utama untuk menganalisis sistem fondasi tiang: model terpisah (*decoupled*) dan model simultan (*coupled*). Model terpisah menganalisis struktur atas dan fondasi secara independen dalam dua tahap terpisah, di mana output dari analisis struktur atas menjadi input untuk analisis fondasi. Pendekatan ini telah menjadi praktik standar dalam desain fondasi konvensional karena kesederhanaannya dan ketersediaan *software* khusus seperti GROUP (Reese et al., 2016). Carbonari et al. (2018) mengembangkan model parameter terpusat untuk analisis SSI dalam domain waktu, yang memungkinkan integrasi efek inersia tanah ke dalam analisis struktur. Analisis tiang dalam model terpisah umumnya menggunakan metode p - y curve yang dikembangkan oleh Reese dan Matlock untuk tanah kohesif, yang memodelkan tahanan lateral tanah sebagai serangkaian pegas nonlinear independen. Kurniawan et al. (2025) dalam studinya tentang struktur dermaga menunjukkan bahwa pendekatan *fixity point* yang merupakan penyederhanaan dari model terpisah dapat menghasilkan deviasi signifikan dibandingkan dengan model SSI menggunakan spring, khususnya pada parameter momen lentur dan defleksi lateral.

Sebaliknya, model simultan mengintegrasikan struktur atas, *pilecap*, tiang fondasi, dan interaksi tanah dalam satu sistem analisis terpadu. Pendekatan ini memungkinkan kompatibilitas deformasi antara semua komponen dan redistribusi beban yang lebih realistis. Koronides et al. (2024) dalam analisis struktur dermaga menunjukkan bahwa model simultan mampu menangkap efek fleksibilitas *pilecap* dan transfer momen antar kolom yang diabaikan dalam pendekatan terpisah. Implementasi model simultan memerlukan pemodelan soil spring nonlinear berupa p - y spring untuk tahanan lateral, t - z spring untuk friksi selimut aksial, dan q - z spring untuk tahanan ujung tiang. Yang et al. (2020) melalui pengujian meja getar skala besar pada bangunan tinggi dengan peredam viskos membuktikan pentingnya memperhitungkan interaksi tiang-tanah-struktur secara simultan untuk mendapatkan respons seismik yang akurat. Penelitian terkait validasi daya dukung fondasi tiang bor yang dilakukan oleh Kurniawan et al. (2025) pada tanah tufa di ITERA menunjukkan pentingnya koreksi empiris terhadap kondisi tanah lokal, di mana hasil perhitungan empiris dapat memberikan estimasi berlebih (*overestimated*) dengan faktor koreksi berkisar 0,344 hingga 0,714.

Beberapa penelitian terdahulu telah membandingkan kedua pendekatan tersebut. Dutta dan Roy (Chandra Dutta & Roy, 2002) melaporkan perbedaan hingga 30% pada gaya aksial tiang untuk struktur di atas tanah lunak. Gazetas dan Mylonakis (1998) menunjukkan bahwa model simultan menghasilkan gaya dalam yang lebih besar pada hampir seluruh konfigurasi *pilecap*. Namun, studi-studi tersebut umumnya hanya menyajikan selisih relatif (persentase perbedaan) tanpa mengevaluasi apakah perbedaan tersebut bermakna secara praktis dalam konteks desain. Pertanyaan kritis yang belum terjawab adalah: apakah perbedaan numerik yang besar selalu berarti perbedaan yang signifikan terhadap keputusan desain?

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis signifikansi perbedaan respon fondasi tiang antara model terpisah dan simultan dengan pendekatan yang berbeda dari studi sebelumnya. Selain menyajikan perbandingan kuantitatif, penelitian ini mengevaluasi signifikansi praktis menggunakan parameter rasio pemanfaatan (*utilization ratio*), yaitu perbandingan antara gaya yang terjadi dengan kapasitas ijin. Studi kasus dilakukan pada Gedung C-D Institut Teknologi Sumatera, sebuah bangunan pendidikan 3 lantai dengan sistem fondasi tiang bor pada kondisi tanah lempung kaku. Batasan penelitian meliputi: studi bersifat numerik tanpa validasi data lapangan, kondisi tanah terbatas pada lempung kaku, dan geometri struktur spesifik pada bangunan 3 lantai berbentuk L.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Konsep interaksi struktur-tanah

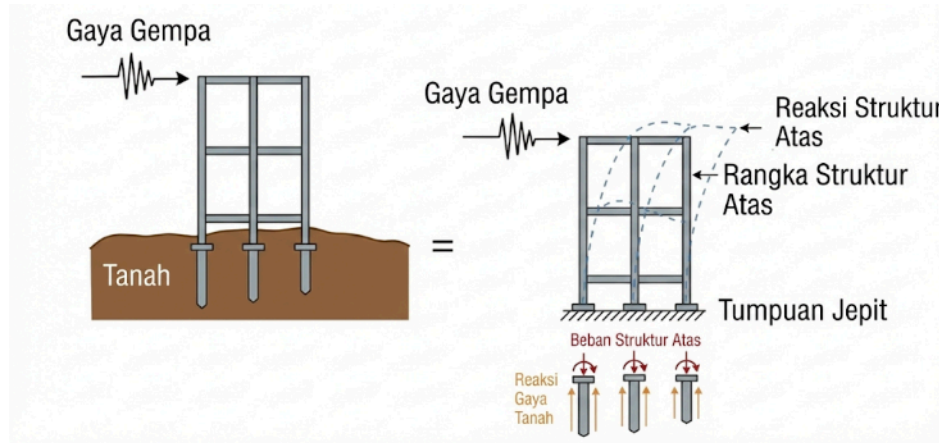
Interaksi struktur-tanah (SSI) merupakan fenomena yang menggambarkan hubungan timbal balik antara respons struktur dan perilaku tanah pendukungnya (Wolf, 1985). Ketika struktur mengalami pembebanan, tanah di sekitar fondasi akan berdeformasi dan memberikan reaksi yang mempengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan. Sebaliknya, perpindahan struktur akan memodifikasi tegangan dan regangan pada massa tanah. Fenomena ini menjadi semakin kompleks pada kondisi pembebanan dinamik seperti gempa, di mana karakteristik frekuensi natural sistem akan berubah akibat fleksibilitas tanah (Stewart et al., 1999)

Dalam konteks fondasi tiang, interaksi struktur-tanah melibatkan tiga mekanisme transfer beban utama: tahanan lateral (p-y), friksi selimut (t-z), dan tahanan ujung (q-z). Reese dan Matlock mengembangkan konsep kurva p-y untuk tanah kohesif yang memodelkan hubungan nonlinear antara tahanan tanah per satuan panjang dengan defleksi lateral tiang (Reese et al., 2016). Konsep serupa dikembangkan untuk arah aksial melalui kurva t-z dan q-z yang menggambarkan mobilisasi friksi selimut dan tahanan ujung sebagai fungsi dari perpindahan vertikal tiang.

2.2 Model analisis terpisah (*decoupled analysis*)

Model analisis terpisah merupakan pendekatan konvensional yang telah lama digunakan dalam praktik rekayasa fondasi. Pendekatan ini membagi proses analisis menjadi dua tahap yang independen: analisis struktur atas dan analisis fondasi. Pada tahap pertama, struktur atas dimodelkan dengan asumsi perletakan jepit (*fixed base*) pada dasar kolom, mengabaikan fleksibilitas tanah dan fondasi. Hasil analisis berupa reaksi tumpuan kemudian digunakan sebagai input beban untuk analisis fondasi pada tahap kedua.

Keunggulan utama model terpisah terletak pada kesederhanaannya dan ketersediaan *software* khusus yang telah teruji seperti GROUP (Reese et al., 2016) dan LPILE. Pendekatan ini juga memungkinkan engineer struktur dan geoteknik bekerja secara paralel dengan keahlian masing-masing. Namun, asumsi *fixed base* pada struktur atas dapat menghasilkan distribusi gaya yang berbeda dengan kondisi aktual, khususnya pada tanah dengan kekakuan rendah hingga sedang. Kurniawan et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan metode *fixity point* sebagai penyederhanaan dapat menghasilkan perbedaan signifikan pada momen maksimum tiang dibandingkan dengan model SSI yang memperhitungkan interaksi tanah-tiang secara eksplisit yang dapat dilihat pada Gambar 1.

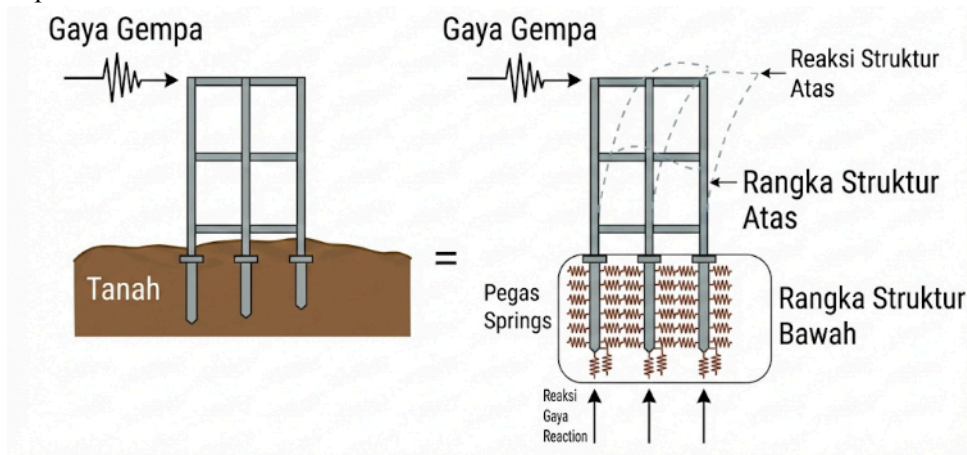


Gambar 1. Skema Analisis Terpisah (*Decoupled*)

2.3 Model analisis simultan (*coupled analysis*)

Model analisis simultan mengintegrasikan struktur atas, *pilecap*, tiang fondasi, dan interaksi tanah dalam satu model terpadu. Pendekatan ini memungkinkan kompatibilitas deformasi antara semua komponen sistem, sehingga redistribusi beban dapat terjadi secara realistis. Koronides et al. (2024) menekankan bahwa model simultan mampu menangkap efek-efek yang diabaikan dalam pendekatan terpisah, seperti rotasi *pilecap*, transfer momen antar kolom, dan pengaruh kekakuan relatif struktur-fondasi-tanah terhadap distribusi gaya.

Implementasi model simultan memerlukan representasi perilaku tanah melalui elemen pegas nonlinear yang ditempatkan sepanjang tiang. Tiga jenis pegas yang diperlukan meliputi: (1) *p-y spring* yang memodelkan tahanan lateral tanah sebagai fungsi defleksi horizontal; (2) *t-z spring* yang memodelkan mobilisasi friksi selimut sebagai fungsi perpindahan relatif tanah-tiang; dan (3) *q-z spring* yang memodelkan mobilisasi tahanan ujung sebagai fungsi perpindahan vertikal ujung tiang. Parameter pegas ini dapat diturunkan dari analisis program khusus seperti LPILE dan SHAFT, atau dari formulasi empiris yang tersedia dalam literatur. Skema analisis model simultan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Analisis Simultan (*Coupled*)

3. METODE PENELITIAN

3.1 Deskripsi objek studi

Objek studi adalah Gedung C-D yang berlokasi di kampus Institut Teknologi Sumatera (ITERA), Lampung Selatan, pada koordinat 5°21'36.92"S; 105°18'50.24"T. Gedung ini berfungsi sebagai fasilitas pendidikan dengan konfigurasi 3 lantai utama dan 1 lantai atap, membentuk denah berbentuk L. Sistem struktur menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

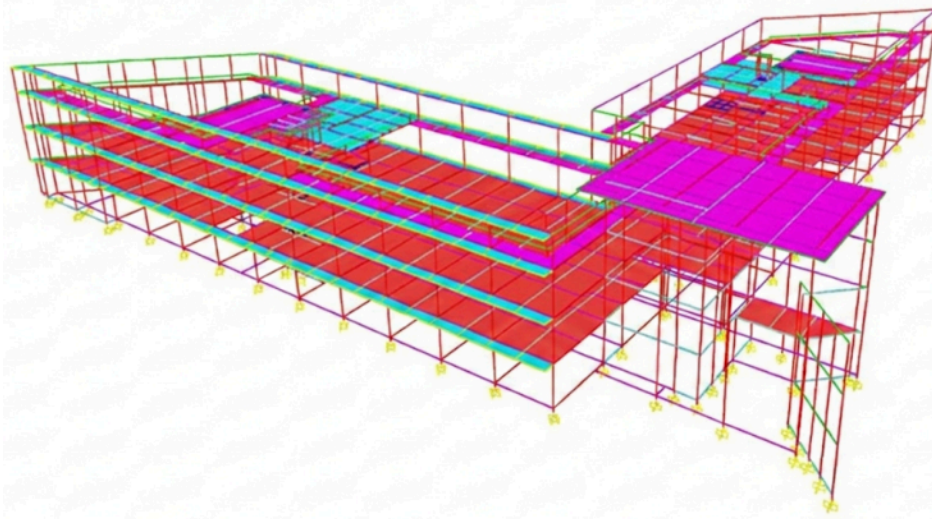
sesuai SNI 1726:2019. Spesifikasi gedung disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 3 merupakan visualisasi struktur Gedung C-D pada aplikasi ETABS.

Tabel 1. Spesifikasi Gedung C-D ITERA

Parameter	Nilai
Nama Gedung	Gedung C-D ITERA
Jumlah Lantai	3 lantai + 1 lantai atap
Tinggi Total	17.10 m
Beda Elevasi Antar Lantai	4.20 m
Sistem Struktur	SRPMK
Mutu Beton	f _c 25 MPa
Mutu Baja Tulangan	BJ-41 (f _y = 250 MPa)

3.2 Kondisi geoteknik

Investigasi geoteknik dilakukan melalui tiga titik bor (BH-2, BH-3, BH-4) dengan kedalaman hingga 25 m menggunakan metode *Standard Penetration Test* (SPT). Profil tanah menunjukkan dominasi lempung berlanau pasiran (*sandy silty clay*) dengan konsistensi kaku hingga keras (*stiff to hard*). Muka air tanah bervariasi antara 4.50-5.35 m di bawah permukaan tanah. Lapisan tanah keras (*hard clay*) dengan N-SPT > 60 dijumpai pada kedalaman 16-20 m. Berdasarkan SNI 1726:2019, lokasi tergolong kelas situs SD (tanah sedang). Parameter tanah diperoleh dari korelasi empiris terhadap nilai N-SPT, dengan *undrained shear strength* (cu) dihitung menggunakan korelasi Terzaghi (1976). Rekapitulasi parameter tanah disajikan pada Tabel 2.



Gambar 3. Bentuk Struktur Gedung C-D ITERA pada program ETABS

Tabel 2. Spesifikasi Gedung C-D ITERA

Zona	Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N-SPT	cu (kPa)	γ _{sat} (kN/m ³)	ε ₅₀
1 (BH-4) GWL: 4.70m	0 – 12	<i>Sandy Silty Clay (VS)</i>	24	160	19.0	0.005
	12 – 15	<i>Clay (VS)</i>	20	133	19.0	0.005
	19 – 25	<i>Clay Stone (H)</i>	61	407	19.0	0.003
2 (BH-3) GWL: 5.35m	0 – 10	<i>Sandy Silty Clay (VS)</i>	22	147	19.0	0.005
	10 – 16	<i>Clay (VS)</i>	30	200	19.0	0.005
	20 – 25	<i>Clay Stone (H)</i>	61	407	19.0	0.003
3 (BH-2) GWL: 4.50m	0 – 8	<i>Sandy Silty Clay (S)</i>	16	107	19.0	0.005
	8 – 15	<i>Clay (H)</i>	31	207	19.0	0.004
	20 – 25	<i>Clay Stone (H)</i>	65	433	19.0	0.003

Keterangan: VS = Very Stiff, S = Stiff, H = Hard

3.3 Spesifikasi fondasi tiang

Sistem fondasi menggunakan tiang bor (*bored pile*) dengan diameter 600 mm dan panjang 12 m, menghasilkan rasio kelangsingan $L/D = 20$. Total tiang yang direncanakan sebanyak 204 buah yang tersebar dalam berbagai konfigurasi *pilecap*. Spesifikasi fondasi tiang disajikan pada Tabel 3, sedangkan konfigurasi *pilecap* yang dievaluasi disajikan pada Tabel 4. Gambar 4 merupakan denah *pilecap* dan fondasi Gedung C-D ITERA.

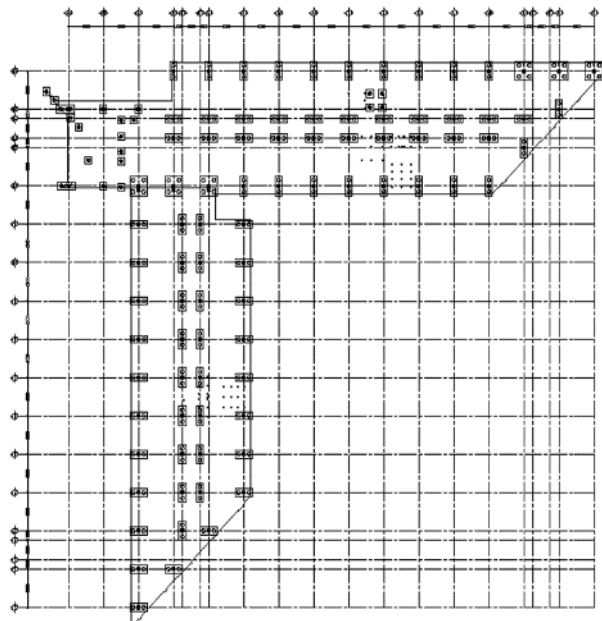
Tabel 3. Spesifikasi Fondasi Tiang Bor

Parameter	Nilai
Jenis Fondasi	Bored Pile (tiang bor lurus)
Diameter (D)	600 mm
Panjang (L)	12 m
Jumlah Total	204 tiang
Tulangan Longitudinal	8 D22 ($\rho = 1.09\%$)
Tulangan Transversal	Ø10-200 (spiral)
Selimit Beton	75 mm

Tabel 4. Konfigurasi *Pilecap* yang Dievaluasi

No	Tipe	Jumlah Tiang	Dimensi (m)	Jumlah Unit	Zona BH
1	PC-1	1	$1.2 \times 1.2 \times 0.6$	18	1,2,3
2	PC-2	2	$3.0 \times 1.2 \times 0.6$	81	1,2,3
3	PC-4A*	4	$3.0 \times 3.0 \times 0.6$	3	2
4	PC-4B*	4	$3.0 \times 3.0 \times 0.6$	3	1

**Pilecap* gabungan akibat overlapping (menopang 2 kolom)

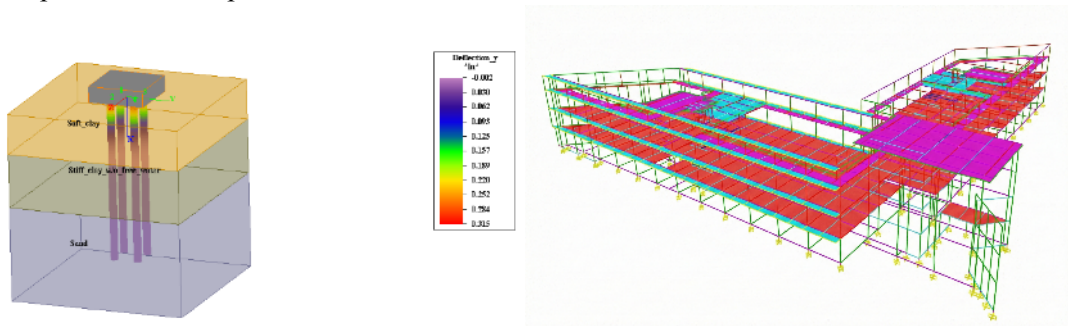


Gambar 4. Denah *pilecap* pada Gedung C-D ITERA

3.4 Pendekatan pemodelan

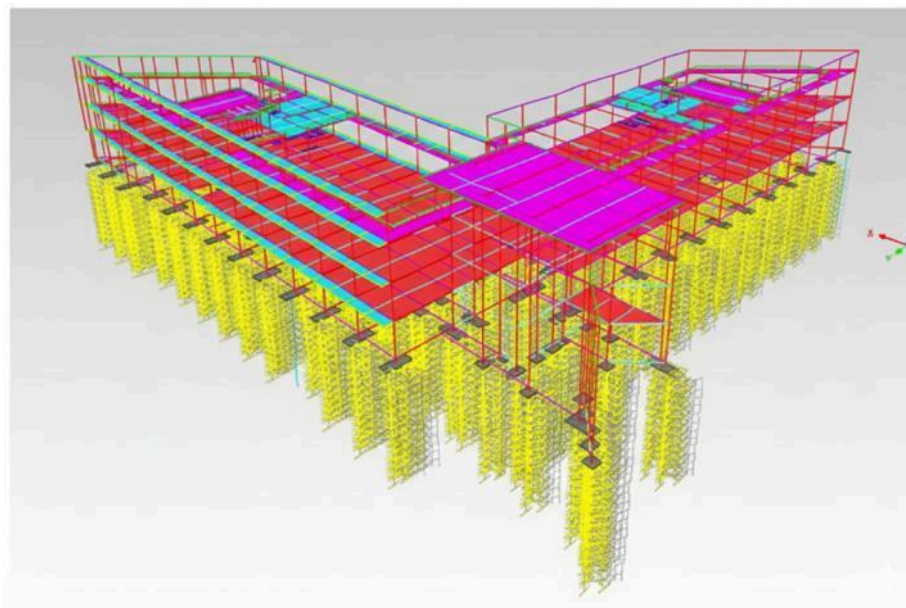
Model Terpisah (*Decoupled*). Analisis dilakukan dalam dua tahap terpisah. Tahap pertama, struktur atas dimodelkan dan dianalisis menggunakan perangkat lunak ETABS 2016 dengan asumsi perletakan jepit pada dasar kolom, menghasilkan output reaksi tumpuan (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z). Tahap kedua, sistem fondasi tiang dianalisis menggunakan *software* GROUP 2016 dengan input

beban dari tahap pertama dan parameter tanah sesuai metode *p-y curve Reese*. *Pilecap* diasumsikan berperilaku kaku (*rigid*) tanpa redistribusi beban balik ke struktur atas. Gambaran pemodelan Model Terpisah diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan Terpisah Gedung C-D menggunakan program GROUP dan ETABS

Gambar 6. memberikan gambaran pemodelan Model Simultan (*Coupled*). Struktur atas dan sistem fondasi dimodelkan secara terintegrasi dalam satu model ETABS. Tiang fondasi direpresentasikan sebagai elemen *frame* vertikal yang terhubung langsung dengan *pilecap*. Interaksi tanah-tiang dimodelkan menggunakan tiga jenis *nonlinear spring*: (1) *p-y spring* untuk tahanan lateral, memodelkan hubungan *nonlinear* antara tahanan tanah per satuan panjang dan defleksi horizontal tiang; (2) *t-z spring* untuk friksi selimut, memodelkan mobilisasi friksi aksial sepanjang selimut tiang; dan (3) *q-z spring* untuk tahanan ujung, memodelkan mobilisasi *end bearing* pada ujung bawah tiang. Parameter spring diperoleh dari analisis program LPILE dan SHAFT. Analisis dilakukan menggunakan metode *nonlinear static*.



Gambar 6. Pemodelan simultan Gedung C-D menggunakan program ETABS

3.5 Kondisi PEMBEBANAN

Analisis menggunakan metode *Allowable Stress Design (ASD)* dengan kombinasi beban sesuai SNI 1726:2012. Deformasi ijin (δ) berdasarkan SNI SNI 8460:2017. Tiga kondisi pembebanan yang dievaluasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kombinasi Beban ASD

Kondisi	Kombinasi Beban	δ ijin (mm)
Statik	1.0D + 1.0L	12

Gempa Nominal	1.09D ± 0.91Ex ± 0.27Ey	12
Gempa Kuat	1.09D ± 2.10Ex ± 0.63Ey (Ω ₀)	25

3.6 Parameter evaluasi

Evaluasi dilakukan berdasarkan empat parameter: gaya aksial maksimum (P), momen lentur maksimum (M), gaya geser maksimum (V), dan defleksi lateral kepala tiang (δ). Penelitian ini memperkenalkan Rasio Pemanfaatan (*Utilization ratio*/UR) sebagai indikator signifikansi praktis, dihitung dengan persamaan $UR = (\text{Gaya Hasil Analisis} / \text{Kapasitas Ijin}) \times 100\%$. Perbedaan UR (ΔUR) diklasifikasikan: ΔUR < 5% tidak signifikan, 5-15% cukup signifikan, dan > 15% signifikan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kapasitas ijin fondasi

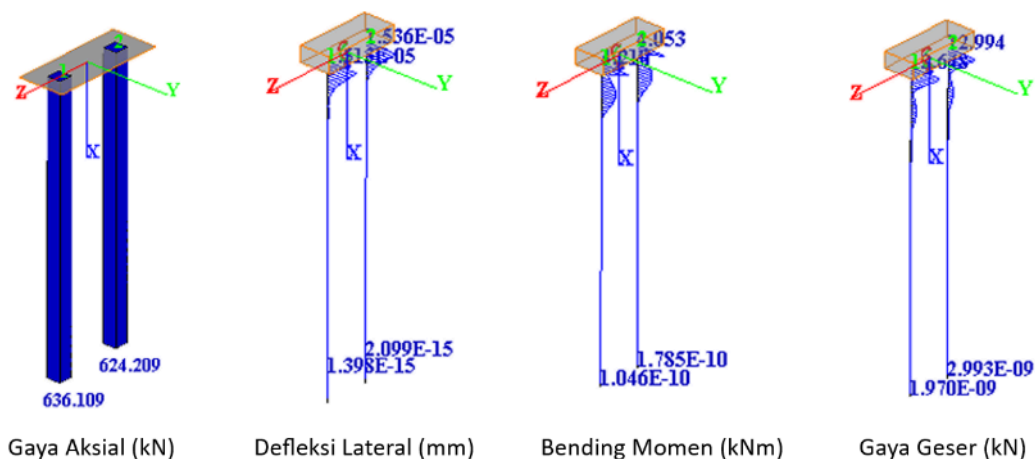
Kapasitas ijin fondasi tiang dihitung sebagai acuan *utilization ratio*. Daya dukung aksial tiang tunggal dihitung menggunakan metode Reese & Wright untuk tanah kohesif dengan faktor keamanan SF = 2.5. Daya dukung ujung (Qp) dihitung dengan persamaan $Q_p = A_p \times N_c \times c_u$, sedangkan daya dukung selimut (Qs) dihitung dengan menjumlahkan kontribusi friksi dari setiap lapisan tanah menggunakan adhesi factor (α). Kapasitas momen ijin ditentukan dari analisis diagram interaksi P-M menggunakan PCA Column, sedangkan kapasitas lateral ijin ditentukan berdasarkan analisis LPILE dengan kriteria defleksi tidak melebihi batas ijin. Rekapitulasi kapasitas ijin disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kapasitas Ijin Fondasi Tiang

Parameter	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Metode
Qall aksial (kN)	685.82	745.44	705.78	Reese & Wright
Mn ijin (kN-m)	396	396	396	PCA Column
Vn ijin (kN)	198.00	192.40	161.60	LPILE
δ ijin kuat (mm)	25	25	25	SNI 8460:2017

4.2 Hasil analisis model terpisah

Analisis model terpisah dilakukan menggunakan *software* GROUP 2016. Beban input diperoleh dari reaksi tumpuan hasil analisis struktur atas di ETABS. Gambar 7 menunjukkan visualisasi hasil analisis untuk *pilecap* PC-2 pada kondisi gempa nominal, yang memperlihatkan distribusi gaya aksial, defleksi lateral, momen lentur, dan gaya geser sepanjang batang tiang.



Gambar 7. Distribusi respon tiang pada *pilecap* PC-2 hasil analisis GROUP

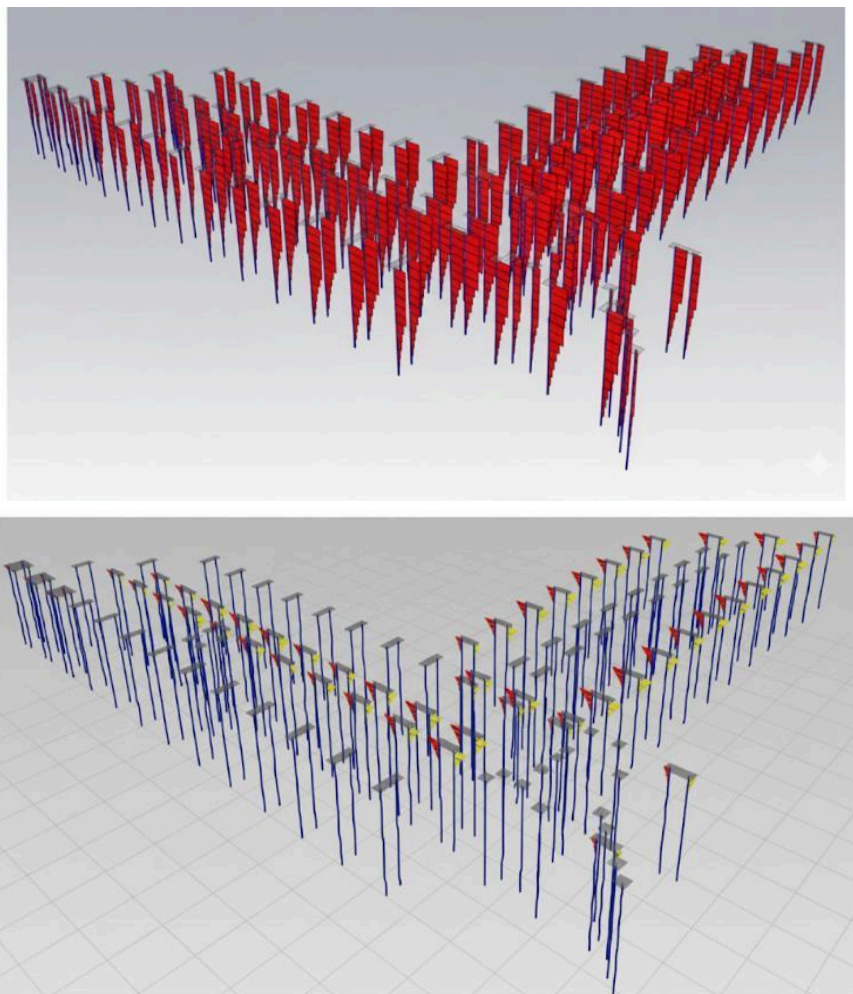
Rekapitulasi hasil analisis model terpisah untuk seluruh tipe *pilecap* pada tiga kondisi pembebanan disajikan pada Tabel 7. Nilai yang ditampilkan merupakan nilai maksimum dari masing-masing parameter pada setiap tipe *pilecap*.

Tabel 7. Hasil Analisis Model Terpisah (GROUP)

Tipe PC	Kondisi	P maks (kN)	δ maks (mm)	M maks (kN-m)	V maks (kN)	Zona
PC-1	Statik	381.35	0.011	3.31	11.09	2
	Nominal	421.88	0.015	4.65	17.09	2
	Kuat	460.60	0.020	5.05	20.19	2
PC-2	Statik	585.25	0.011	3.31	11.09	3
	Nominal	560.05	0.030	4.65	17.09	3
	Kuat	636.10	0.015	4.21	13.64	3
PC-4A	Statik	295.01	0.003	0.52	3.06	2
	Nominal	389.12	0.035	10.22	9.35	2
	Kuat	472.19	0.050	14.69	12.47	2
PC-4B	Statik	214.97	0.015	3.85	10.23	1
	Nominal	278.65	0.025	5.12	14.87	1
	Kuat	314.12	0.035	6.20	17.59	1

4.3 Hasil analisis model simultan

Pemodelan simultan dilakukan dengan mengintegrasikan struktur atas dan fondasi dalam satu model ETABS. Gambar 8 menampilkan distribusi gaya aksial dan momen lentur pada sistem fondasi sebagai respons terhadap kombinasi pembebanan.



Gambar 8. Distribusi gaya dalam sistem fondasi hasil model simultan

Rekapitulasi hasil analisis model simultan untuk seluruh tipe *pilecap* disajikan pada Tabel 8. Hasil menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan model terpisah, terutama pada parameter momen dan gaya geser untuk *pilecap* multi-kolom.

Tabel 8. Hasil Analisis Model Simultan (ETABS)

Tipe PC	Kondisi	P maks (kN)	δ maks (mm)	M maks (kN-m)	V maks (kN)	Zona
PC-1	Statik	406.58	0.018	3.05	1.85	2
	Nominal	443.25	0.025	4.25	2.35	2
	Kuat	478.17	0.030	4.90	2.63	2
PC-2	Statik	611.90	0.025	1.35	1.20	3
	Nominal	584.12	0.077	4.25	2.61	3
	Kuat	664.26	0.077	2.70	1.69	3
PC-4A	Statik	664.26	0.014	20.55	10.28	2
	Nominal	453.89	0.065	48.75	25.67	2
	Kuat	513.56	0.089	70.10	35.33	2
PC-4B	Statik	251.38	0.022	18.45	12.15	1
	Nominal	315.72	0.058	38.92	22.45	1
	Kuat	359.57	0.078	55.13	31.29	1

4.4 Perbandingan hasil analisis

Hasil analisis dari kedua model dibandingkan untuk kondisi pembebanan kritis (gempa kuat). Tabel 9 menyajikan perbandingan komprehensif yang mencakup nilai gaya, selisih relatif, kapasitas ijin, serta rasio pemanfaatan (UR) beserta selisihnya (ΔUR).

Tabel 9. Perbandingan Hasil Analisis (Kondisi Kuat)

Tipe	Parameter	Terpisah	Simultan	Δ (%)	Ijin	UR-T	UR-S	ΔUR
PC-1	Aksial (kN)	460.60	478.17	+3.8	745.44	61.8%	64.1%	+2.3%
	Defleksi (mm)	0.020	0.030	+50	25.00	0.08%	0.12%	+0.04%
PC-2	Aksial (kN)	636.10	664.26	+4.4	705.78	90.1%	94.1%	+4.0%
	Defleksi (mm)	0.015	0.077	+413	25.00	0.06%	0.31%	+0.25%
PC-4A	Aksial (kN)	472.19	513.56	+8.8	745.44	63.3%	68.9%	+5.6%
	Momen (kN-m)	14.69	70.10	+377	396.00	3.7%	17.7%	+14.0%
PC-4B	Aksial (kN)	314.12	359.57	+14.5	685.82	45.8%	52.4%	+6.6%
	Momen (kN-m)	6.20	55.13	+789	396.00	1.6%	13.9%	+12.3%

Keterangan: UR-T = UR model Terpisah, UR-S = UR model Simultan

Berdasarkan hasil perbandingan, dapat diidentifikasi dua pola perilaku. Pola pertama terjadi pada konfigurasi *pilecap* sederhana (PC-1, PC-2) dengan ΔUR aksial < 5% dan ΔUR momen < 2%, yang tergolong tidak signifikan secara praktis. Pola kedua terjadi pada *pilecap* multi-kolom (PC-4A, PC-4B) dengan ΔUR aksial 5-7% dan ΔUR momen 12-14%, yang tergolong cukup signifikan.

Fenomena menarik terjadi pada defleksi PC-2 dengan selisih relatif 413% namun ΔUR hanya 0.25%. Hal ini karena kedua model menghasilkan defleksi sangat kecil (0.015 mm vs 0.077 mm) dibanding kapasitas ijin (25 mm), sehingga keduanya hanya menggunakan < 1% kapasitas. Secara matematis, rasio dua nilai kecil menghasilkan persentase besar, namun secara praktis tidak bermakna dalam konteks desain.

Pada *pilecap* multi-kolom, perbedaan momen yang signifikan (ΔUR 12-14%) terjadi karena model simultan mampu menangkap efek rotasi *pilecap* dan transfer momen antar kolom yang tidak diperhitungkan dalam model terpisah. Meskipun demikian, rasio pemanfaatan maksimum masih di bawah 18%, yang berarti masih tersisa margin keamanan cukup besar.

Temuan penelitian memiliki implikasi praktis: untuk *pilecap* sederhana (*single column*, 1–2 tiang), model terpisah masih dapat diterima karena $\Delta UR < 5\%$, sejalan dengan temuan Chandra Dutta & Roy (2002) yang menunjukkan bahwa pendekatan terpisah menghasilkan perbedaan yang dapat ditoleransi pada sistem fondasi dengan konfigurasi sederhana. Untuk *pilecap* multi-kolom atau konfigurasi kompleks, model simultan direkomendasikan karena mampu menangkap efek redistribusi beban dan transfer momen antar kolom yang tidak dapat direpresentasikan oleh model terpisah (Koronides et al., 2024a; Gazetas et al., 1998).

Keterbatasan penelitian meliputi: (1) studi bersifat numerik tanpa validasi data pengujian lapangan, sehingga diperlukan pengujian fisik seperti uji beban statik atau *shaking table* untuk memverifikasi hasil model (Yang et al., 2020); (2) kondisi tanah terbatas pada lempung kaku, sementara Hokmabadi & Fatahi (2016) menunjukkan bahwa pengaruh SSI menjadi jauh lebih signifikan pada tanah lunak hingga sedang, sehingga temuan penelitian ini tidak dapat langsung digeneralisasi untuk kondisi tanah lunak; (3) geometri struktur spesifik pada bangunan 3 lantai berbentuk L; serta (4) tidak memperhitungkan efek dinamis dan respons seismik transien, padahal fenomena SSI pada kondisi pembebanan gempa melibatkan interaksi yang jauh lebih kompleks antara karakteristik frekuensi alami sistem dan perilaku tanah (Wolf, 1985; Yang et al., 2020).

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan:

1. Model simultan menghasilkan gaya aksial 4-15% lebih besar dibanding model terpisah, dengan ΔUR berkisar 2-7% yang tergolong tidak hingga cukup signifikan.
2. Perbedaan paling signifikan terjadi pada momen lentur *pilecap* multi-kolom (PC-4A, PC-4B) dengan ΔUR mencapai 12-14%, mengindikasikan bahwa transfer momen antar kolom hanya dapat ditangkap oleh model simultan.
3. Selisih relatif besar (ratusan persen) pada defleksi tidak bermakna secara praktis karena terjadi pada nilai absolut kecil dengan $\Delta UR < 1\%$, menunjukkan bahwa persentase perbedaan dapat menyempatkan tanpa konteks kapasitas ijin.
4. Kedua pendekatan menghasilkan desain yang memenuhi kriteria keamanan SNI 2847:2019 dan SNI 8460:2017, sehingga pemilihan metode dapat didasarkan pada kompleksitas konfigurasi fondasi.
5. Sebagai rekomendasi praktis, model terpisah masih dapat diterima untuk *pilecap* sederhana (1-2 tiang per kolom) pada tanah lempung kaku karena efisiensi waktu dengan $\Delta UR < 5\%$. Model simultan direkomendasikan untuk *pilecap* multi-kolom atau struktur dengan kontrol deformasi ketat. Penelitian lanjutan diperlukan untuk validasi dengan data pengujian lapangan serta studi parametrik pada kondisi tanah lunak untuk mengevaluasi apakah pola signifikansi serupa juga berlaku.

DAFTAR PUSTAKA

- Carbonari, S., Morici, M., Dezi, F., & Leoni, G. (2018). A lumped parameter model for time-domain inertial soil-structure interaction analysis of structures on pile foundations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(11), 2147–2171. <https://doi.org/10.1002/eqe.3060>
- Chandra Dutta, S., & Roy, R. (2002). A critical review on idealization and modeling for interaction among soil-foundation-structure system. *Computers and Structures*, (80), 1579–1594. www.elsevier.com/locate/compstruc
- Gazetas, G., Hess, P., Zinn, R., Mylonakis, G., & Nikolaou, A. (1998, September). Seismic response of a large pile group. *8th European Conference on Earthquake Engineering*.

- Hokmabadi, A. S., & Fatahi, B. (2016). Influence of Foundation Type on Seismic Performance of Buildings Considering Soil-Structure Interaction. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16(8). <https://doi.org/10.1142/S0219455415500431>
- Stewart, J. P., Fenves, G. L., & Seed, R. B. (1999). *SEISMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN BUILDINGS. I: ANALYTICAL METHODS*.
- Koronides, M., Michailides, C., & Onoufriou, T. (2024a). Nonlinear Soil–Pile–Structure Interaction Behaviour of Marine Jetty Structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/jmse12071153>
- Koronides, M., Michailides, C., & Onoufriou, T. (2024b). Nonlinear Soil–Pile–Structure Interaction Behaviour of Marine Jetty Structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/jmse12071153>
- Kurniawan, R., Aprilia, A. S., Grace, M., Saputra, C. A., & Yufrizal, A. A. (2025). Analysis of Jetty Structure Using the Fixity Point Method and Soil–Structure Interaction via the Spring Model. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 9(3), 1694–1706. <https://doi.org/10.70609/g-tech.v9i3.6863>
- Kurniawan, R., Aprilia, A. S., Syuhada, S., Sitepu, A. R. H., Yufrizal, A. A., & Asni, Y. (2025). Kajian Daya Dukung Aksial Fondasi Tiang Bor pada Tanah Tufa Berdasarkan Uji PDA di Gedung Laboratorium Teknik 3 ITERA. *Jurnal Media Konstruksi*, 10(1), 47–58.
- Mylonakis, G., Nikolaou, S., & Gazetas, G. (2006). Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(9), 824–853. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.12.005>
- Reese, L. C., Isenhower, W. M., & Shin-Tower, P. E. (2016). *User's Manual for LPILE 2016 (Using Data Format Version 9) A Program to Analyze Deep Foundations Under Lateral Loading*. www.ensoftinc.com.
- SNI 1726:2019. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847:2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 8460:2017. Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Wolf, J. P. (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction* (W. J. Hall, Ed.). Prentice-Hall.
- Yang, J., Lu, Z., & Li, P. (2020). Large-scale shaking table test on tall buildings with viscous dampers considering pile-soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110960>