

Pengaruh Pemodelan Soil-Structure Interaction pada Kinerja Struktur: Studi Kasus Tipologi Bangunan Sekolah Indonesia

*Adrian Ulza¹, Halida Yunita², Yunita Idris³, Ratu Shara Faradiba⁴

^{1,2,3,4}Departemen Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala, Aceh, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: Feb 15, 2025

Revised: March 07, 2025

Accepted: March 27, 2025

Available online: April 30, 2025

KEYWORDS

Soil-structure-interaction, performance, structural, foundation, seismic

* CORRESPONDENCE

E-mail: adrian_ulza@usk.ac.id

A B S T R A C T

This study evaluates the impact of Soil-Structure Interaction (SSI) on the dynamic response of low-rise school buildings in Indonesia. Three SSI models were developed: spring supports (SSI I), distributed springs on a plate (SSI II), and soil modeled as solid elements (SSI III), compared to a benchmark model. The analysis revealed that SSI III produced the highest displacement, shear force, and overturning moment responses but required significantly longer computation time. In contrast, SSI II demonstrated more efficient results by reducing internal forces and structural displacement. This study provides insights into the implementation and contribution of SSI modeling in structural analysis

1. PENDAHULUAN

Pengaruh interaksi struktur dengan tanah, atau lazimnya dikenal dengan *Soil-Structure Interaction* (SSI) seringkali diabaikan dalam praktik analisis struktur bangunan. Padahal, teknik pemodelan SSI sudah cukup berkembang, dan sudah diadopsi pada standar bangunan [1], [2], dan juga menunjukkan pengaruh yang signifikan untuk dapat dipertimbangkan dalam pemodelan [3], [4]. Dalam praktik umum, model struktur sering diasumsikan terjepit secara lateral pada dasar elemen kolom struktural.

Namun, asumsi berikut tidak selalu akurat karena saat terjadi eksitasi gempa, terdapat interaksi kinematik dan interaksi inersia yang memengaruhi respons struktur dan fondasi [5]. Interaksi kinematik terjadi akibat pengaruh fondasi terhadap propagasi gelombang tanah, yang mengubah input gerakan tanah ke struktur. Di sisi lain, interaksi inersia mencerminkan hubungan antara struktur, fondasi, dan tanah sekitarnya, di mana gaya inersia dari struktur ditransfer ke tanah melalui fondasi. Kombinasi dari kedua interaksi ini menyebabkan bangunan tidak hanya merespons gerakan tanah secara bebas (*free-field motion*) tetapi juga mengalami perubahan karakteristik gerakan akibat interaksi tersebut. Beberapa studi menunjukkan bahwa pemodelan SSI dapat mempengaruhi beberapa aspek kinerja seismik bangunan, salah satunya adalah disipasi energi seismik [6], [7].

Dikutip dari beberapa literatur [5], [8], pengaruh pemodelan SSI terhadap kinerja seismik bangunan cenderung tidak signifikan apabila bangunan memiliki fondasi yang kaku, massa yang ringan, dan berdiri di atas tanah keras yang sangat kaku (*bedrock*). Sebaliknya, kontribusi SSI menjadi sangat signifikan terhadap respons struktur pada kondisi tanah yang sangat fleksibel atau lunak, terutama pada bangunan tingkat tinggi yang memiliki periode panjang sehingga dapat mengamplifikasi gaya gempa [9], [10], dan ketika periode natural struktur mendekati periode natural tanah. Selain itu, beberapa studi juga mengungkapkan bahwa kontribusi SSI dapat tetap signifikan pada bangunan dengan tingkat rendah [11], [12] dan bangunan tingkat sedang [13].

Studi ini berfokus untuk mengevaluasi pengaruh pemodelan SSI dalam analisis struktur dengan menggunakan beberapa pendekatan model. Model SSI I menggunakan tumpuan pegas sesuai panduan [5], model SSI II menerapkan distribusi pegas pada pelat dengan parameter yang sama [5], dan model SSI III memodelkan tanah sebagai elemen solid dengan analisis *3D-Finite-Element-Method* [3], [13], [14]. Respons ketiga model dibandingkan dengan model *benchmark* menggunakan pendekatan konvensional dengan tumpuan jepit. Objek penelitian adalah bangunan sekolah bertingkat rendah, dipilih untuk mengevaluasi pengaruh SSI sekaligus menilai kinerja struktur bangunan sekolah di Indonesia. Bangunan sekolah memiliki peran strategis sebagai pusat pendidikan dan lokasi evakuasi darurat, sehingga kinerja struktur terhadap gempa menjadi prioritas. Desain bangunan sekolah di Indonesia mengacu pada petunjuk teknis (Juknis) [15], yang mencakup kriteria arsitektural dan pendetailan seismik berdasarkan kelas intensitas gempa.

Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan gambaran kontribusi pemodelan SSI dan meningkatkan keandalan desain struktur bangunan sekolah terhadap risiko gempa bumi. Meskipun penerapan SSI dapat memperpanjang proses perancangan, karena diperlukan analisis yang lebih detail, namun penerapan SSI dapat memberikan gambaran yang lebih mendalam terhadap respons struktur bangunan terhadap beban gempa.

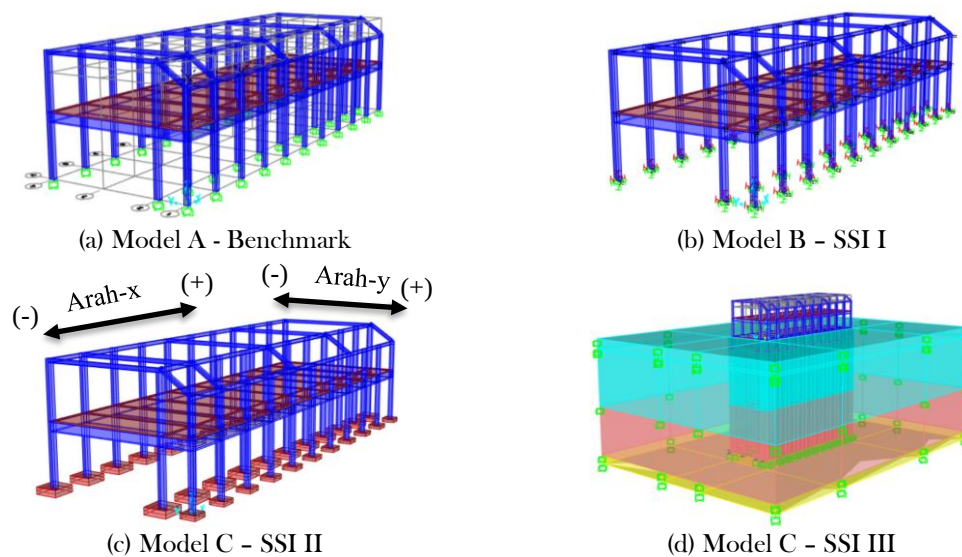
2. METODE PENELITIAN

Evaluasi terhadap teknik pemodelan SSI dilakukan dengan menganalisis respons sebuah bangunan yang dikenakan beban gempa. Parameter yang dievaluasi meliputi respons perpindahan, gaya geser lantai, dan momen guling. Penjelasan lebih rinci disampaikan pada sub-bab berikutnya.

2.1 Tahapan Review

Objek penelitian yang digunakan adalah model tipologi gedung sekolah yang diadaptasi dari studi [16], berdasarkan asesmen tipologi bangunan sekolah di Banda Aceh. Model ini merujuk pada standar bangunan sekolah tipikal di Indonesia [15]. Bangunan yang dimaksud merupakan struktur rangka pemikul momen khusus berbahan beton bertulang dengan dua lantai. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000. Karakteristik material struktur meliputi mutu beton $f_c' = 21$ MPa dan mutu baja tulangan 420 MPa.

Untuk mengevaluasi pengaruh SSI, struktur dimodelkan menggunakan empat opsi perlakuan tumpuan yang berbeda. Model pertama, yaitu Model A, menggunakan tumpuan jepit yang berfungsi sebagai acuan atau benchmark. Model kedua, Model B, menerapkan tumpuan pegas yang merepresentasikan kondisi SSI I. Selanjutnya, Model C menggunakan tumpuan pegas yang diaplikasikan pada pelat, menggambarkan kondisi SSI II. Terakhir, Model D memodelkan tanah secara langsung untuk merepresentasikan kondisi SSI III. Keempat model ini dirancang untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh masing-masing perlakuan tumpuan terhadap respons struktur bangunan yang dikenakan beban gempa. Visualisasi masing-masing model diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Visualisasi pemodelan struktur untuk masing-masing model

2.2 Tahapan Review

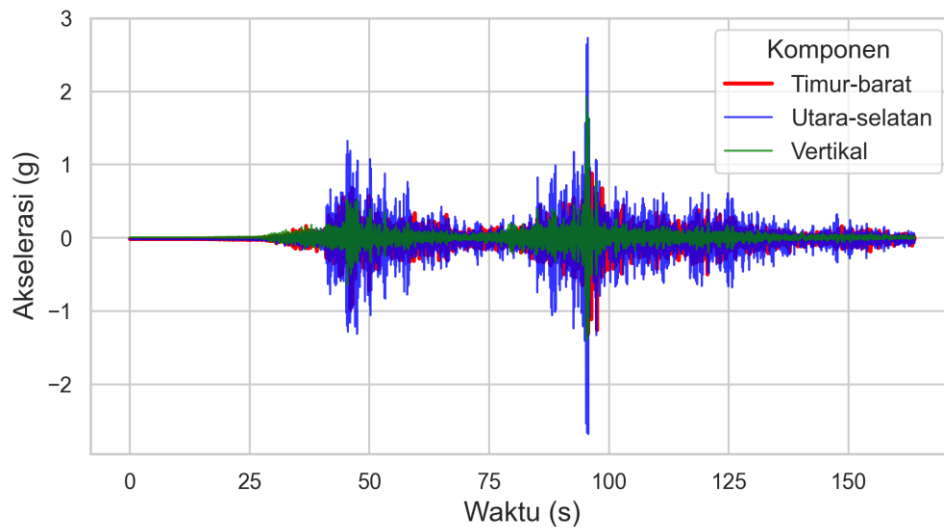
Analisis struktur dilakukan menggunakan metode *Non-linear Time History Analysis* (NLTHA) dengan mode komputasi integrasi waktu langsung. Dalam proses ini, digunakan solusi penyelesaian dengan menggunakan Hilber-Hughes-Taylor (HHT), dengan koefisien gamma, beta, dan alpha, masing-masing sebesar 0,5, 0,25, dan 0. Parameter ini memformulasikan metode akselerasi rata-rata atau yang dikenal sebagai *trapezoidal rule*. Redaman struktur dianalisis menggunakan pendekatan *mass-proportional* dan *stiffness-proportional*, yang dihitung berdasarkan getaran fundamental mode pertama. Redaman diasumsikan sebesar 5%. Periode mode pertama dan kedua untuk masing-masing model struktur dirangkum dalam Tabel 1. Perlu dicatat bahwa periode getar untuk Model D tidak dapat dibandingkan secara langsung karena model ini melibatkan tanah sehingga tidak kompatibel dengan model lainnya. Sebagai catatan tambahan, respons inelastik komponen struktur dimodelkan dengan sendi plastis.

Tabel 1 Perbandingan mode getar setiap model

Model struktur	Periode	
	Mode 1	Mode 2
Model A (benchmark)	0,743	0,586
Model B (SSI I)	0,749	0,601
Model C (SSI II)	0,768	0,623
Model D (SSI III)	Tidak tersedia*	

*Mengikutsertakan model tanah, sehingga periode getar tidak kompatibel untuk dibandingkan.

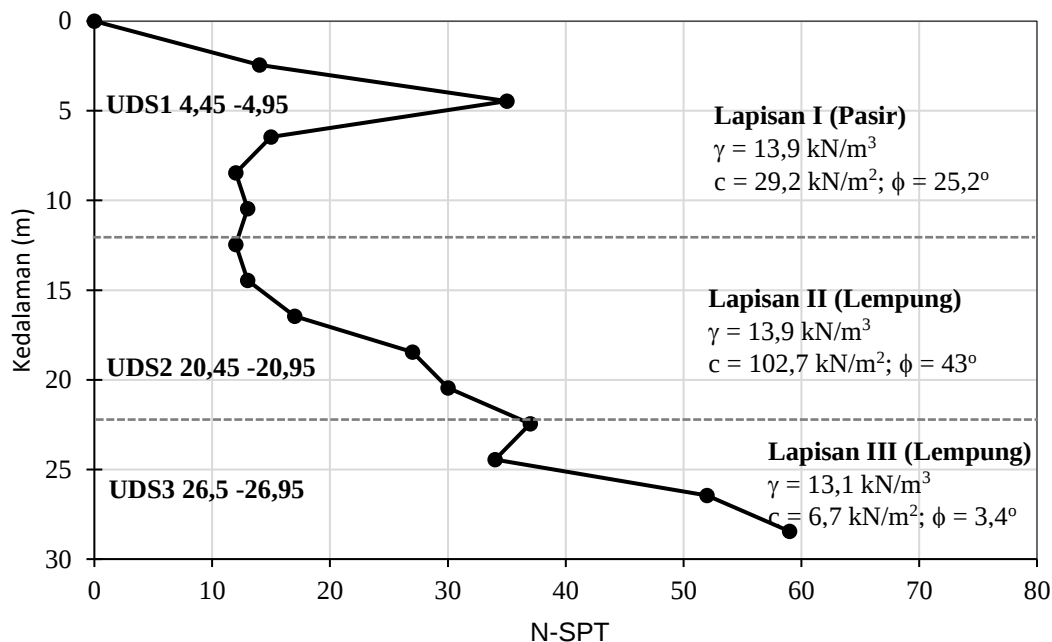
Rekaman gempa yang digunakan merupakan gempa Tohoku tahun 2011 (Magnitudo 9 Mw), diperoleh dari database NIED Hi-net [17]. Pemilihan rekaman gempa ini bertujuan untuk mengevaluasi respons ekstrem dari struktur gedung dua lantai yang dirancang dengan baik untuk menahan beban gempa kuat dengan lokasi rekaman dekat dengan patahan (*near-fault*). Meskipun bukan berasal dari Indonesia, rekaman ini diharapkan dapat merepresentasikan karakteristik gempa kuat dari zona subduksi, seperti Gempa Aceh 2004. Analisis mempertimbangkan kedua komponen eksitasi lateral, dan eksitasi vertikal. Riwayat waktu gempa diberikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Rekaman gempa Tohoku 2011

2.2 Tahapan Review

Parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan ini diperoleh melalui investigasi geoteknik in-situ di salah satu lokasi di lingkungan Universitas Syiah Kuala, Kecamatan Darussalam, Banda Aceh. Perlu ditekankan bahwa penelitian ini bukan merupakan studi deterministik untuk mengevaluasi kondisi bangunan eksisting, melainkan bertujuan mengevaluasi pengaruh SSI pada pemodelan, khususnya pada bangunan rendah dengan klasifikasi tanah sedang. Berdasarkan hasil investigasi geoteknik hingga kedalaman 30 meter dan metode klasifikasi tanah yang diatur dalam SNI [2], tanah pada lokasi penelitian dikategorikan sebagai tanah sedang. Grafik hasil pengujian Standar Penetration Test (SPT) ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Grafik N-SPT in-situ di lingkungan kompleks USK

Dimensi fondasi bangunan adalah $1,5 \times 1,5$ m dengan ketebalan 30 cm dan kedalaman 2 m [15]. Parameter konstanta pegas untuk model SSI I diperoleh berdasarkan panduan pemodelan SSI [5], [8]. Nilai modulus geser tanah regangan minimum, G_0 , ditentukan dari Pers. (1) [18].

$$G_0 = \frac{\gamma v_{s0}^2}{g} \quad (1)$$

Dimana g adalah berat jenis tanah dalam satuan g/cm^3 , g adalah konstanta gravitasi seniali $9,8 \text{ m/s}^2$, dan v_{s0} adalah kecepatan gelombang geser dalam satuan m/s yang diperoleh dari hubungan empiris antara kecepatan gelombang geser dan N-SPT [19], sebagaimana diformulasikan Pers. (2).

$$V_s = 84N^{0,310} \quad (2)$$

Nilai modulus geser tanah, G diperoleh dari rasio modulus geser efektif (G/G_0) berdasarkan tabel Tabel 2.

Tabel 2 Rasio modulus geser efektif (G/G_0) [1]

Site class	Effective Peak Acceleration, $S_{ns}/2.5$			
	$S_{ns}/2.5 = 0$	$S_{ns}/2.5 = 0,1$	$S_{ns}/2.5 = 0,4$	$S_{ns}/2.5 \geq 0,8$
A	1,00	1,00	1,00	1,00
B	1,00	1,00	0,95	0,90
C	1,00	0,95	0,75	0,60
D	1,00	0,90	0,50	0,10
E	1,00	0,60	0,05	B
F	B	B	b	B

Nominal kekakuan pegas untuk model SSI I ditunjukkan paa Tabel 3. Model pegas ini dimodelkan secara nonlinier dengan tipe *compression-only* dan menggunakan solusi aproksimasi [20] dari N-SPT sebagaimana dijelaskan dalam panduan [5], [8].

Tabel 3 Nominal kekakuan pegas untuk model SSI I

Parameter	Nominal
K_x dan K_y (lateral)	534.807,7 N/mm
K_z (vertikal)	426.300,3 N/mm
K_x dan K_y (rotasi sumbu lateral)	1.372.852.704.849 N/mm/rad
K_z (rotasi sumbu vertikal)	906.425.638.029 N/mm/rad

Untuk model SSI II, fleksibilitas fondasi dimodelkan dengan menggunakan elemen pelat fondasi, di mana pegas didistribusikan ke elemen fondasi berdasarkan luas permukaan. Nominal pegas SSI I digunakan sebagai acuan, kemudian dibagi dengan luas fondasi untuk setiap arah yang dipertimbangkan. Nilai ini didistribusikan secara merata di sepanjang tepi elemen fondasi untuk pegas lateral dan di permukaan dasar fondasi untuk pegas vertikal. Nominal kekakuan pegas untuk model SSI II dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 4 Nominal kekakuan pegas untuk model SSI II

Parameter	Nominal
K_x dan K_y (lateral)	1,188 N/mm/mm ²
K_z (vertikal)	0,189 N/mm/mm ²

Model SSI III memodelkan tanah sebagai elemen solid dengan karakteristik tensor tegangan-regangan isotropik, melibatkan enam komponen bebas. Parameter tanah seperti densitas, kohesi, dan sudut gesek diberikan sesuai hasil investigasi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Bila dilakukan pengamatan, terdapat inkonsistensi hasil interpretasi antara nilai N-SPT dan hasil uji sampel tanah tidak terganggu (UDS). Sebagai contoh, pada elevasi 26 m, nilai N-SPT menunjukkan kepadatan tanah yang baik (N-SPT = 42), sementara sampel UDS menunjukkan tanah lunak dengan kohesi $6,7 \text{ kN/m}^2$ dan sudut gesek $3,4^\circ$. Untuk menghindari bias interpretasi, dalam pemodelan SSI III, lapisan 3 dianggap seragam

dengan lapisan 2. Pendekatan alternatif dapat menggunakan hubungan empiris N-SPT untuk menentukan nilai kohesi dan sudut gesek. Namun, dalam studi ini, parameter diambil langsung dari data UDS.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis struktur bangunan tipologi sekolah yang dikenakan beban gempa untuk setiap model struktur dibahas pada bab ini.

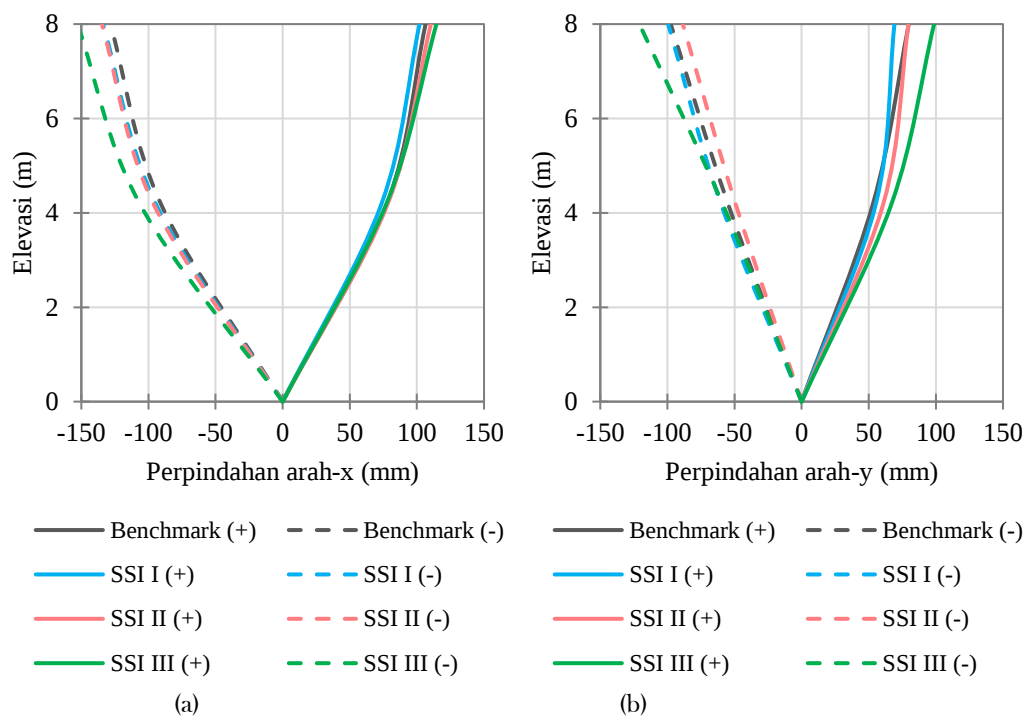
3.1 Respons perpindahan bangunan

Perbandingan respons perpindahan maksimum arah-x dan arah-y untuk setiap model bangunan dirangkum dalam Tabel 5. Perpindahan maksimum yang dilaporkan adalah nominal perpindahan maksimum selama respons riwayat waktu, yang ditinjau pada sisi depan dan belakang, serta sisi kiri dan kanan bangunan. Secara konsisten, nominal perpindahan untuk semua model SSI menunjukkan respons perpindahan yang lebih besar dibandingkan model *benchmark*. Nilai perpindahan pada model SSI I dan SSI II secara umum menunjukkan selisih yang cukup seragam, kecuali pada arah perpindahan-y pada elevasi +8,0 m, di mana respons perpindahan lebih kecil (-9,24%) dibandingkan model *benchmark*. Deviasi perpindahan terhadap model *benchmark* berkisar sekitar 10%. Sementara itu, respons perpindahan model SSI III menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan, dengan perpindahan lebih besar sekitar 17-23% dibandingkan model *benchmark*.

Tabel 5 Rangkuman perpindahan maksimum

Elevasi (m)	Arah-x (m)						
	Benchmark	SSI I		SSI II		SSI III	
	(m)	(m)	dev (%)	(m)	dev (%)	(m)	dev (%)
+ 0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
+ 4,2	90,92	94,70	4,17	96,42	6,05	106,62	17,27
+ 8,0	128,30	133,86	4,33	134,73	5,02	152,86	19,15
Elevasi (m)	Arah-y (m)						
	Benchmark	SSI I		SSI II		SSI III	
	(m)	(m)	dev (%)	(m)	dev (%)	(m)	dev (%)
+ 0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
+ 4,2	54,97	60,26	9,63	60,92	10,82	67,08	22,04
+ 8,0	97,54	99,42	1,93	88,53	-9,24	120,88	23,93

Grafik perpindahan maksimum yang disajikan pada Gambar 4 menunjukkan respons perpindahan akibat gempa pada arah-x, yang diamati dari sisi depan (+) dan sisi belakang (-), serta pada arah-y, yang diamati dari sisi kanan (+) dan sisi kiri (-). Dari grafik tersebut, terlihat bahwa model benchmark cenderung menunjukkan perpindahan minimum dibandingkan dengan model SSI. Namun, pada elevasi +8,0 m, terdapat variasi tren perpindahan. Model SSI I menunjukkan perpindahan minimum pada arah-x (+) dan arah-y (+), sedangkan model SSI II menunjukkan nilai minimum pada arah-y (+) dan arah-y (-). Di sisi lain, model SSI III secara konsisten menunjukkan respons perpindahan maksimum dibandingkan semua model lainnya.

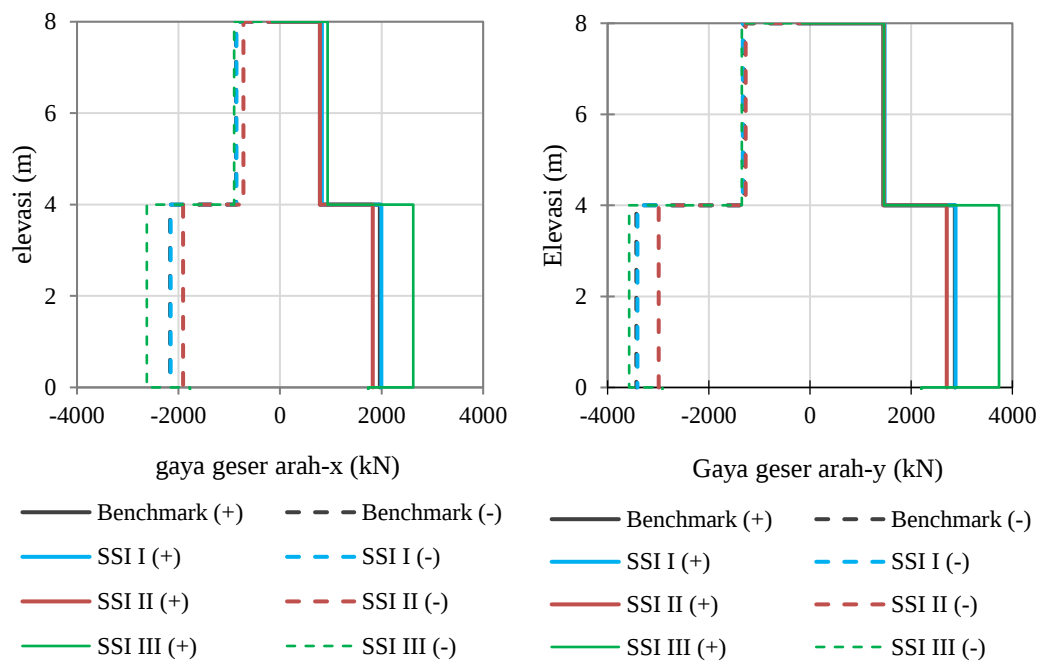


Gambar 4 Perpindahan maksimum bangunan: (a) arah-x; dan (b) arah-y

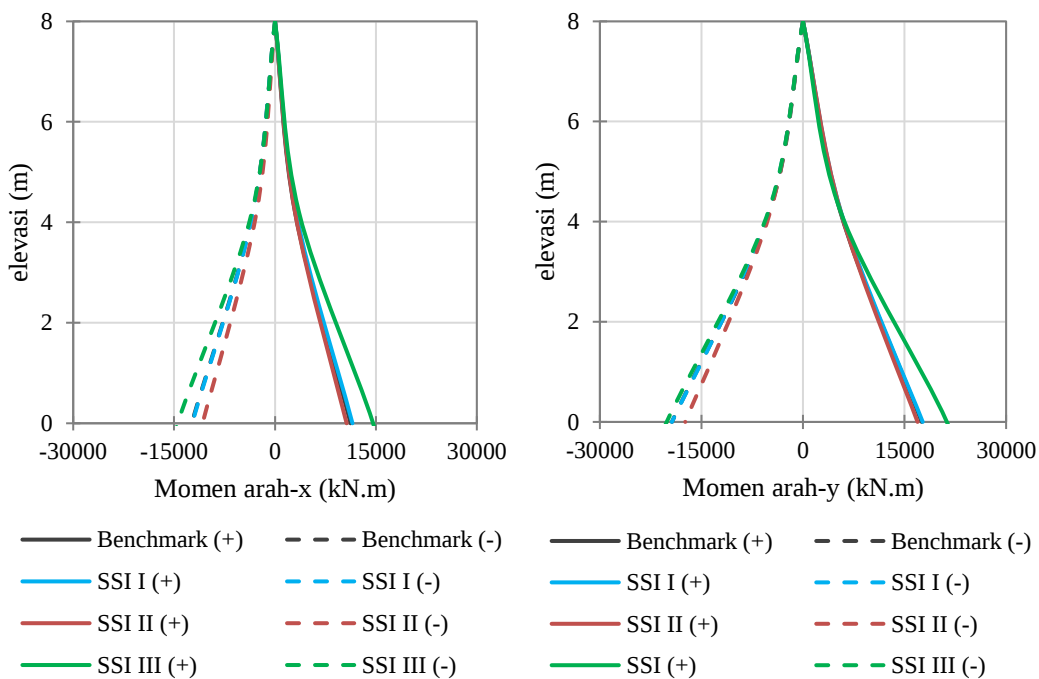
3.2 Gaya geser dan momen guling bangunan

Grafik respons gaya geser lantai ditunjukkan pada Gambar 5 memberikan gambaran mengenai distribusi gaya geser pada berbagai model struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa model SSI II memiliki nominal gaya geser lantai yang paling rendah dibandingkan dengan model lainnya. Sebaliknya, model benchmark dan model SSI I menunjukkan nominal gaya geser lantai yang hampir serupa, yang mengindikasikan pola respons struktural yang sebanding di antara keduanya. Di sisi lain, model SSI III menunjukkan nominal gaya geser lantai yang paling tinggi, yang konsisten dengan pola yang juga diamati pada respons perpindahan maksimum. Hal ini dapat dihubungkan dengan karakteristik parameter tanah yang digunakan dalam model SSI III, yang tampaknya memberikan kontribusi lebih besar terhadap intensitas gaya geser pada lantai bangunan.

Selain itu, pola serupa juga terlihat pada output momen guling bangunan, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 6. Hasil analisis menunjukkan bahwa momen guling terendah terjadi pada model SSI II. Sebaliknya, model SSI III menunjukkan nilai momen guling tertinggi, dan melengkapi temuan trend sebelumnya, bahwa model ini memiliki respons dinamis yang lebih signifikan terhadap beban gempa. Tingginya nominal momen guling pada model SSI III kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan pendekatan dalam mendefinisikan parameter tanah, yang menyebabkan peningkatan gaya lateral dan rotasi pada struktur.



Gambar 5 Gaya geser lantai



Gambar 6 Momen guling

3.3 Diskusi

Hasil analisis struktur pada setiap model menunjukkan pola yang menarik dalam memahami pengaruh SSI terhadap respons bangunan terhadap beban gempa. Pada aspek respons perpindahan, model *benchmark* cenderung menunjukkan nilai perpindahan yang fluktuatif dibandingkan model SSI I dan SSI II, sedangkan model SSI III secara konsisten memiliki respons maksimum terhadap model *benchmark*. Sebagai ilustrasi, untuk gaya gempa arah-x, model SSI III memiliki peningkatan perpindahan hingga 7,5% dan 19,1% untuk arah perpindahan positif dan negatif, berturut-turut. Hal ini menunjukkan bahwa

pemodelan SSI secara umum dapat memperkuat respons bangunan, termasuk gaya geser dasar, momen guling, dan perpindahan.

Sementara itu, dalam analisis gaya geser dan momen guling, model SSI II menunjukkan nilai terendah di antara semua model yang dianalisis. Sebagai ilustrasi, untuk kasus gempa arah-x, dibandingkan dengan model *benchmark*, model SSI II memiliki deviasi minimum hingga 7,1% dan 13,1% untuk arah perpindahan positif dan negatif, berturut-turut. Namun, perbedaan nilai perpindahan, gaya geser, dan momen guling antara model-model tersebut cenderung tidak signifikan, kecuali pada model SSI III. Sebagai ilustrasi, untuk arah gempa-x, model SSI III menunjukkan deviasi maksimum hingga 33,4% dan 21,1% untuk arah perpindahan positif dan negatif, berturut-turut. Sebagai catatan, model SSI III secara konsisten menunjukkan nilai perpindahan, gaya geser, dan momen guling tertinggi dibandingkan model lainnya. Peningkatan signifikan ini menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan SSI yang diterapkan pada model SSI III memiliki dampak besar terhadap respons dinamis bangunan. Kemungkinan penyebabnya adalah penggunaan parameter tanah yang berbeda atau asumsi yang lebih konservatif dalam pemodelan SSI, yang menyebabkan amplifikasi gaya lateral dan rotasi pada struktur.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mempelajari pengaruh kontribusi pemodelan SSI terhadap respons dinamis bangunan rendah dengan parameter tanah sedang. Model *benchmark*, tanpa mempertimbangkan model SSI atau dengan tumpuan terjepit secara lateral, cenderung menunjukkan nilai perpindahan yang relatif lebih minimum jika dibandingkan dengan model SSI. Namun, serapan gaya geser lantai dan momen guling pada model SSI II cenderung lebih minimum. Disisi lain, model SSI III menunjukkan perpindahan, gaya geser, dan momen guling tertinggi akibat parameter tanah yang lebih konservatif.

Perlu menjadi perhatian bahwa pemodelan SSI III memiliki kompleksitas paling tinggi diantara semua model, dan membutuhkan durasi analisis yang paling panjang, lebih dari 12 jam. Hal ini sangat berbeda dengan model *benchmark*, SSI I, dan SSI II, dimana analisis NLTHA membutuhkan waktu sekitar 5 s/d 10 menit. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa pemodelan SSI III tidak sebanding dengan manfaat yang diperoleh. Sedangkan model SSI II memiliki keandalan untuk diadopsi karena dapat mereduksi gaya yang terjadi pada bangunan, disamping juga pemodelan langsung pelat dapat memudahkan pengintegrasian analisis dan desain struktur pelat fondasi. Model SSI II juga memiliki waktu komputasi yang lebih efisien daripada SSI III.

5. SARAN

Penelitian lanjutan diharapkan dapat memperluas cakupan analisis dengan meninjau respons dinamis pada bangunan tinggi yang memiliki karakteristik struktur dan perilaku dinamis berbeda dibandingkan bangunan rendah. Selain itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap berbagai klasifikasi tanah, seperti tanah lunak atau tanah keras, untuk memahami pengaruh parameter tanah yang lebih bervariasi terhadap interaksi SSI.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASCE/SEI 7-16, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016. doi: 10.1016/B978-0-7234-5558-5.00006-3.
- [2] Badan Standardisasi Nasional (BSN), "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non-Gedung, SNI 1726:2019," 2019.
- [3] M. V. R. G. Cruz, R. Bento, P. Durand-Neyra, and A. Morales-Esteban, "Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon," *Structures*, vol. 38, pp. 599–617, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.02.024.
- [4] J. Wang, T. Guo, and Z. Du, "Experimental and numerical study on the influence of dynamic structure-soil-structure interaction on the responses of two adjacent idealized structural systems," *J. Build. Eng.*, vol. 52, p. 104454, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104454.
- [5] FEMA P-2091, "A practical guide to soil-structure interaction," 2021.
- [6] S. T. Karapetrou, S. D. Fotopoulou, and K. D. Pitilakis, "Seismic vulnerability assessment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil-structure interaction effects," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*,

- vol. 73, pp. 42–57, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.02.016.
- [7] E. Ahmadi, “On the structural energy distribution and cumulative damage in soil-embedded foundation-structure interaction systems,” *Eng. Struct.*, vol. 182, pp. 487–500, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.12.091.
 - [8] C. B. J. Stewart, T. C. H. Crouse, B. Lizundia, F. Naeim, and O. Farhang, “Soil-structure interaction for building structures, NIST,” 2012.
 - [9] D. Assimaki and E. Kausel, “Modified Topographic Amplification Factors for a Single-Faced Slope due to Kinematic Soil-Structure Interaction,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 133, no. 11, pp. 1414–1431, Nov. 2007, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:11(1414).
 - [10] H. Yazdani, M. Khatibinia, S. Gharehbaghi, and K. Hatami, “Probabilistic Performance-Based Optimum Seismic Design of RC Structures Considering Soil–Structure Interaction Effects,” *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A Civ. Eng.*, vol. 3, no. 2, Jun. 2017, doi: 10.1061/AJRUA6.0000880.
 - [11] H. D. Nguyen and M. Shin, “Effects of soil-structure interaction on seismic performance of a low-rise R/C moment frame considering material uncertainties,” *J. Build. Eng.*, vol. 44, p. 102713, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102713.
 - [12] S. C. Dutta, K. Bhattacharya, and R. Roy, “Response of low-rise buildings under seismic ground excitation incorporating soil–structure interaction,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 24, no. 12, pp. 893–914, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.soildyn.2004.07.001.
 - [13] M. Kamal, M. Inel, and B. T. Cayci, “Seismic behavior of mid-rise reinforced concrete adjacent buildings considering soil-structure interaction,” *J. Build. Eng.*, vol. 51, p. 104296, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104296.
 - [14] M. Firoj, A. Bahuguna, A. Kanth, and R. Agrahari, “Effect of nonlinear soil–structure interaction and lateral stiffness on seismic performance of mid–rise RC building,” *J. Build. Eng.*, vol. 59, p. 105096, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105096.
 - [15] Kementrian PUPR, “Petunjuk teknis standarisasi desain dan penilaian kerusakan sekolah dan madrasah [Technical guidelines for design standardization and damage assessment of schools and madrasah] SE No. 47/SE/DC/2020,” 2020.
 - [16] Q. Salsabila, “Evaluasi Sistem Struktur Bangunan Sekolah Menggunakan Pengembangan Kurva Kerapuhan (Studi kasus: Tipikal Bangunan SMA di Kota Banda Aceh),” *Tugas Sarjana, Tek. Sipil, Univ. Syiah Kuala*, 2023.
 - [17] NIED Hi-net, “National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience.”
 - [18] ASCE/SEI 41-17, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2017. doi: 10.1061/9780784414859.
 - [19] B. Kirar, B. K. Maheshwari, and P. Muley, “Correlation Between Shear Wave Velocity (V_s) and SPT Resistance (N) for Roorkee Region,” *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, vol. 2, no. 1, p. 9, Mar. 2016, doi: 10.1007/s40891-016-0047-5.
 - [20] A. Pais and E. Kausel, “Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 213–227, Oct. 1988, doi: 10.1016/S0267-7261(88)80005-8.