

ANALISIS INTERAKSI TANAH-STRUKTUR FONDASI TIANG AKIBAT BEBAN DINAMIS JEMBATAN KERETA API BAJALINGGEI- SIANTAR

Tondi Amirsyah Putera¹, Zaky Hanafi²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Email: tondiamirsyah@umsu.ac.id

Abstrak. Analisis seismik jembatan kereta api sering mengabaikan fleksibilitas tanah dengan mengasumsikan perletakan jepit (*fixed-base*). Studi ini menginvestigasi pentingnya Interaksi Tanah-Struktur (SSI) terhadap respons dinamis fondasi jembatan kereta api BH-40. Penelitian ini membandingkan empat model elemen hingga, yang masing-masing merepresentasikan jembatan utuh dan substruktur, baik dengan asumsi perletakan jepit maupun dengan memasukkan efek SSI. Pemodelan SSI dilakukan menggunakan pegas tanah nonlinier yang kekakuannya ditentukan dari kurva $p-y$ dan $q-w$, serta disesuaikan untuk efek kelompok tiang. Parameter utama yang dianalisis adalah perpindahan lateral dan gaya-gaya dalam pada pilar. Hasilnya menunjukkan bahwa model yang menyertakan SSI secara signifikan meningkatkan akurasi prediksi perpindahan lateral dibandingkan model perletakan jepit yang kaku. Lebih lanjut, SSI menyebabkan redistribusi gaya dalam yang kompleks. Momen lentur dan gaya geser utama cenderung berkurang, sementara gaya lain seperti torsi mengalami amplifikasi. Ini menyoroti bahwa mengabaikan SSI dapat menghasilkan desain yang tidak hanya terlalu konservatif tetapi juga berpotensi tidak aman untuk komponen tertentu. Studi ini menyimpulkan bahwa model jembatan utuh dengan SSI memberikan prediksi perilaku struktural yang paling realistis. Oleh karena itu, penyertaan SSI sangat penting untuk memastikan desain seismik jembatan yang aman dan ekonomis.

Kata kunci: Interaksi Tanah-Struktur (ITS), Analisis Seismik Jembatan, Model Elemen Hingga.

Diterima Redaksi: 17-09-2025 | Selesai Revisi: 30-11-2025 | Diterbitkan Online: 30-11-2025

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur modern, seperti jembatan, memerlukan perancangan yang cermat dengan mempertimbangkan berbagai aspek krusial. Salah satu faktor penting yang tidak dapat diabaikan adalah perilaku dinamis tanah, terutama di wilayah rawan gempa seperti Indonesia yang berada di zona tektonik aktif. Secara konvensional, analisis struktur sering kali mengasumsikan pondasi jepit (*fixed-base*), yang mengabaikan fleksibilitas tanah. Padahal, pada kenyataannya, interaksi dinamis antara struktur dan tanah dikenal sebagai Interaksi Tanah-Struktur (SSI) memengaruhi respons struktur secara signifikan ketika menerima beban dinamis, seperti gempa. Dengan adanya deformasi tanah, perilaku struktural dapat berbeda jauh dari asumsi perletakan kaku. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan respons struktural Jembatan Kereta Api BH-40, yang berlokasi di jalur Bajalinggei-Siantar, Sumatera Utara, untuk memahami dampak SSI terhadap perilaku jembatan.



Gambar 1: Lokasi jembatan BH-40 (Google Earth).

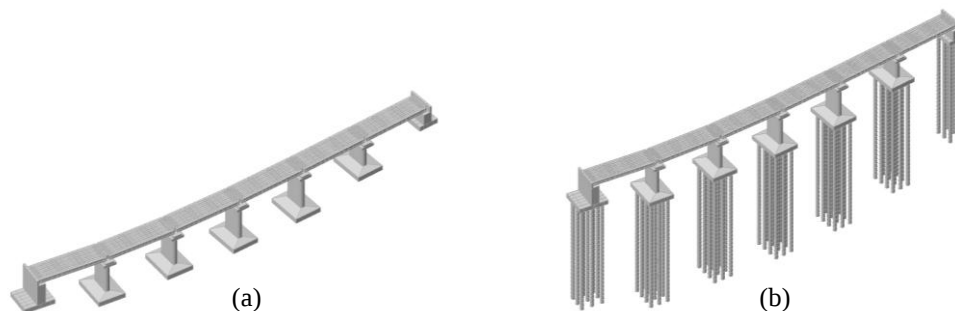
Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons jembatan rel tunggal terhadap beban gempa dengan membandingkan beberapa model analisis yang memperhitungkan pengaruh tanah. Fokus utama investigasi adalah pada perilaku perpindahan lateral di puncak pilar, serta gaya-gaya internal (gaya aksial, gaya geser, dan momen) pada dasar pilar. Struktur jembatan ini terdiri dari enam bentang beton *precast voided slab* yang ditopang oleh fondasi *bore pile* dengan diameter 80 cm. Perbandingan antara kondisi dengan dan tanpa memperhitungkan interaksi tanah-struktur, studi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai performa struktural jembatan saat terpapar beban dinamis seperti gempa.

2. METODE PENELITIAN

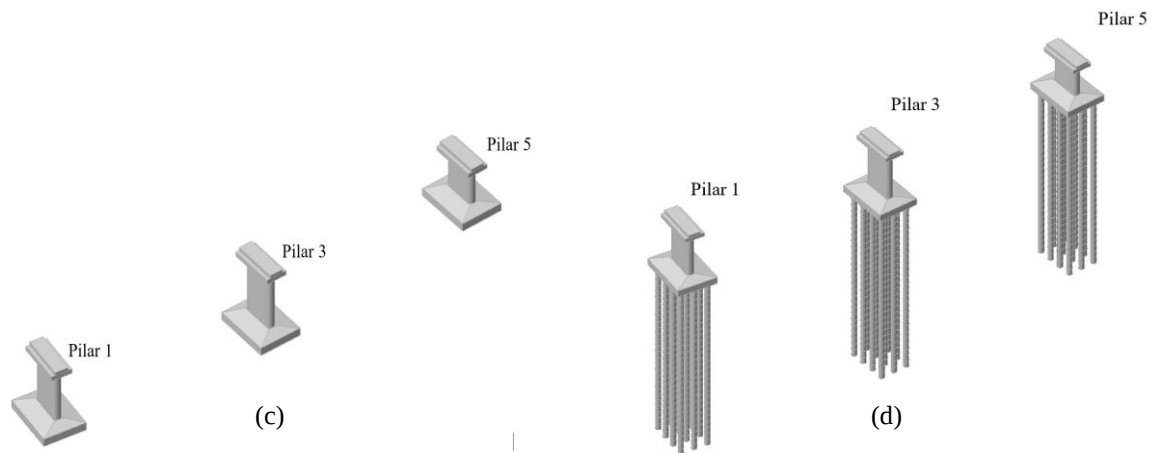
Skenario Pemodelan

Analisis respons jembatan dilakukan dengan membandingkan empat model elemen hingga yang berbeda untuk mengkaji dampak SSI:

- Model 1 (Utuh - *Fixed Base*): Jembatan dimodelkan secara utuh, dari struktur atas hingga pilar, dengan dasar pilar diasumsikan sebagai tumpuan jepit sempurna. Model ini mengabaikan fleksibilitas tanah.
- Model 2 (Utuh - SSI): Jembatan dimodelkan secara utuh. Interaksi antara pondasi tiang bor dan tanah disimulasikan sebagai rangkaian pegas. Model ini merepresentasikan perilaku sistem struktur-tanah yang lebih realistis.
- Model 3 (Substruktur - *Fixed Base*): Hanya struktur bawah (pilar) yang dimodelkan terpisah. Beban dari struktur atas direpresentasikan sebagai beban nodal di puncak pilar, dan dasar pilar diasumsikan jepit.
- Model 4 (Substruktur - SSI): Sama seperti Model 3, namun dengan beban nodal dari hasil Model 2, dan interaksi tanah-struktur dimodelkan menggunakan pegas.



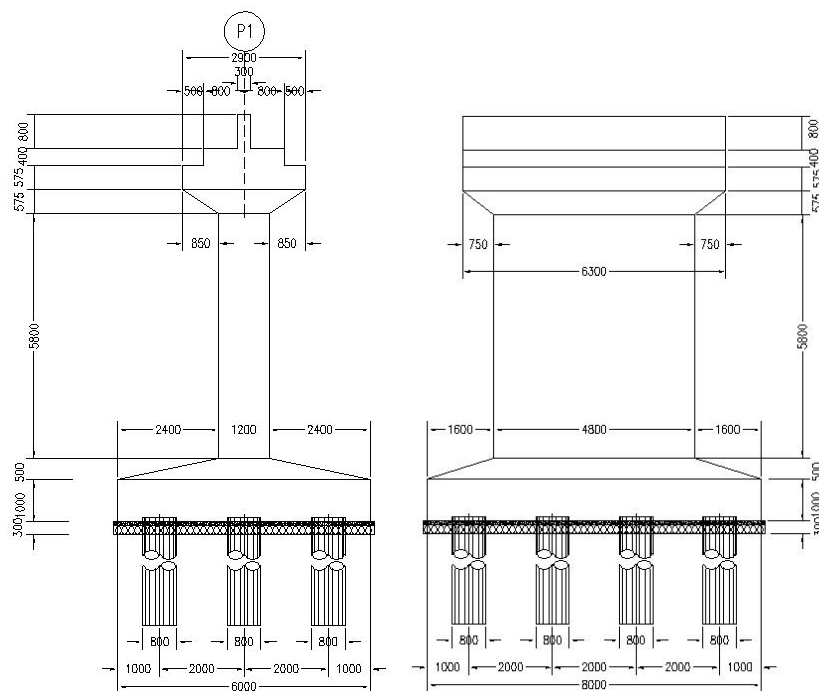
Gambar 2: Model jembatan utuh, a) Model 1: Jembatan utuh dengan tumpuan jepit (*fixed base*); b) Model 2: Jembatan utuh dengan interaksi tanah-struktur (SSI).



Gambar 3: Model jembatan substruktur, c) Model 3: substruktur dengan tumpuan jepit (*fixed base*); d) Model 4: substruktur dengan interaksi tanah-struktur (SSI).

Fokus Pembahasan

Dalam penelitian ini, fokus analisis diletakkan pada perbandingan respons struktural dari empat model jembatan. Model yang berbeda digunakan untuk mewakili variasi ketinggian badan pilar (*pier wall*), yaitu Pilar 1 dengan tinggi 5.8 meter, Pilar 3 dengan ketinggian 6.5 meter, dan Pilar 5 dengan ketinggian 4.0 meter, di mana ketiganya memiliki dimensi dan penampang yang identik. Perbedaan ketinggian ini memungkinkan studi untuk mengevaluasi bagaimana respons struktural jembatan bervariasi. Tinjauan utama dilakukan dengan membandingkan respons struktur antara model yang menggunakan asumsi perletakan jepit (*Fixed Base*) dan model yang memperhitungkan interaksi tanah-struktur (SSI), dengan parameter kunci yang dievaluasi mencakup perpindahan dan gaya dalam pada puncak dan dasar pilar-pilar tersebut.

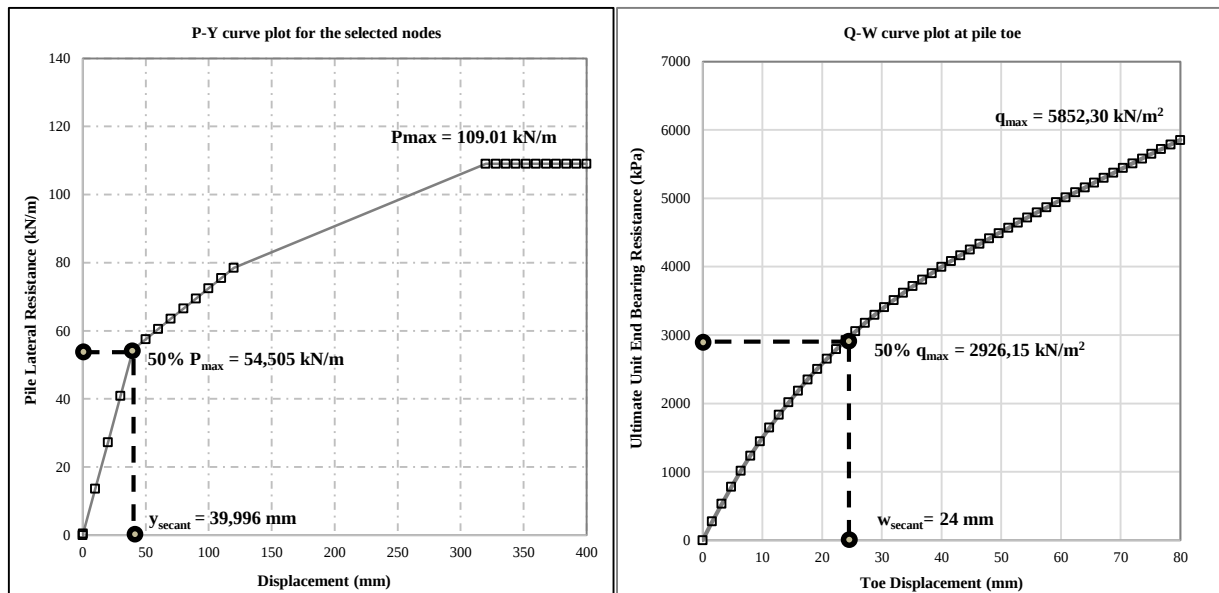


Gambar 4: Tampak samping dan depan pilar 1 jembatan.

Pemodelan Interaksi Tanah-Struktur (SSI)

Dalam penelitian ini, pemodelan Interaksi Struktur-Tanah (SSI) dilakukan menggunakan Metode Substruktur atau pendekatan tidak langsung. Pendekatan ini merepresentasikan pengaruh tanah melalui rangkaian pegas diskrit yang diletakkan pada titik antarmuka antara pondasi tiang dan tanah. Dengan metode ini, fleksibilitas tanah dapat disimulasikan secara efisien tanpa perlu memodelkan seluruh massa tanah.

Implementasi pegas ini melibatkan dua tahapan utama. Pertama, Penentuan Kurva Respons Tanah dilakukan berdasarkan data geoteknik, khususnya hasil uji N-SPT (*Standard Penetration Test*). Data ini digunakan untuk menghasilkan kurva non-linier hubungan beban-deformasi tanah, yaitu kurva $p-y$, $t-z$, dan $q-w$. Kedua, Perhitungan Koefisien Pegas (k_{spring}) dilakukan dengan menggunakan kekakuan sekan (*secant stiffness*) yang diambil dari kurva non-linier pada titik 50% dari kapasitas ultimitnya. Pendekatan ini dipilih karena secara efektif merepresentasikan kekakuan rata-rata tanah yang relevan selama respons gempa, memungkinkan penyederhanaan perilaku non-linier tanah ke dalam model analitis yang bersifat linier.



Gambar 5: Hasil $p-y$ dengan garis *secant stiffness* 50% p_{max} dan $q-w$ dengan garis *secant stiffness* 50% q_{max} .

Koefisien pegas lateral ($k_{lateral}$) dan vertikal ($k_{vertical}$) dihitung menggunakan persamaan:

$$k_{lateral} = \frac{p}{y} \times \Delta z \quad (1).$$

$$k_{vertical} = \frac{q}{w} \times A \quad (2).$$

dimana:

p = tekanan lateral tanah

y = perpindahan horizontal

q = tegangan tahanan ujung tiang

w = perpindahan vertikal

Δz = panjang segmen pengaruh tiang

A = luas penampang tiang

Pembebanan Gempa Rencana

Untuk analisis gempa, jembatan ini mengacu pada standar SNI 2833:2016. Berdasarkan data N-SPT, lokasi proyek dikategorikan sebagai Tanah Sedang (Kelas Situs SD) yang berada di Zona Gempa 3. Nilai rata-rata N-SPT ($\bar{N}$) dihitung dari hasil pengujian dengan kedalaman yang bervariasi. Berdasarkan Tabel 1, nilai N-SPT rata-rata ($\bar{N}$) adalah sebagai berikut:

Tabel 1: Data uji N-SPT dan Perhitungan $\bar{N}$.

Nilai N-SPT		Rata-rata $\bar{N}$	
Kedalaman	N-SPT	Tebal (t)	t/N
m	blows	m	m
2	8	2	0.250
4	5	2	0.400
6	15	2	0.133
8	27	2	0.074
10	39	2	0.051
12	42	2	0.048
14	45	2	0.044
16	40	2	0.050
18	35	2	0.057
20	52	2	0.038
22	57	2	0.035
24	51	2	0.039
26	65	2	0.031
28	67	2	0.030
30	70	2	0.029
32	63	Total (t)	Total (t/N)
34	68	30	1.310

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{t_i}{\bar{N}}\right)} \quad (3).$$

$$\bar{N} = \frac{30}{1,310}$$

$$\bar{N} \approx 22.903$$

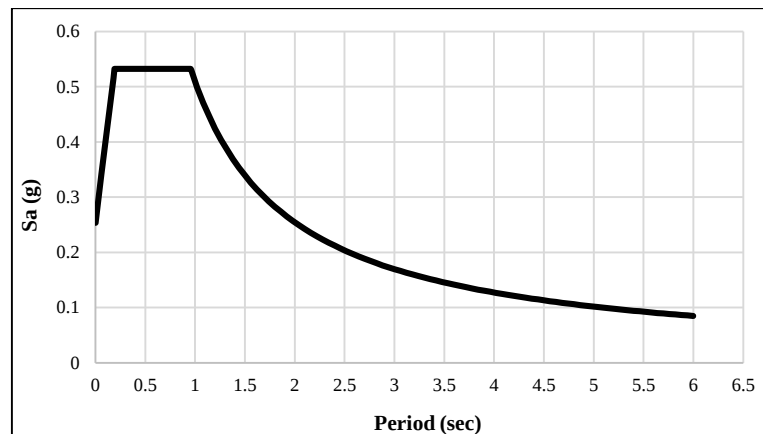
Berdasarkan nilai $\bar{N}$ tersebut dapat diketahui bahwa kelas situs pada lokasi jembatan ini adalah Tanah Sedang (SD). Dengan begitu dari peta gempa dapat diketahui untuk wilayah jembatan ini:

$$PGA = 0,175 \text{ g}$$

$$S_s = 0,35 \text{ g}$$

$$S_1 = 0,275 \text{ g}$$

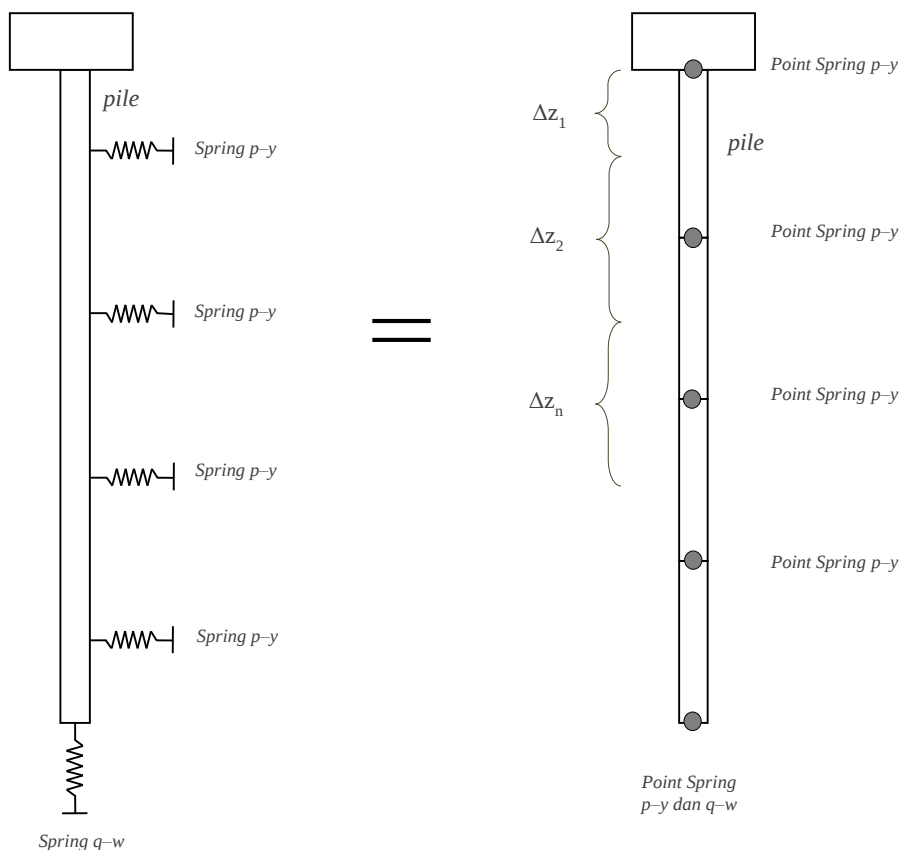
Karena jembatan ini merupakan Jembatan Tidak Beraturan, analisisnya menggunakan Metode Spektra Multimoda (MM). Respons dari tiap mode getaran digabungkan dengan Metode Complete Quadratic Combination (CQC).



Gambar 6: Reson spektrum Bajalinggei.

Implementasi Pegas Pada Model

Pegas-pegas yang sudah dihitung dan dikoreksi diterapkan sebagai tumpuan elastis pada setiap node di sepanjang fondasi tiang. Terdapat dua jenis pegas yang digunakan: pegas lateral ($p-y$) untuk mensimulasikan respons tanah terhadap beban lateral, dan pegas vertikal ($q-w$) yang merepresentasikan tahanan ujung terhadap beban aksial. Untuk kekakuan lateral, pemodelan dilakukan per segmen 1 meter di sepanjang tiang bor, di mana setiap pegas di node menanggung pengaruh setengah meter dari segmen di atas dan di bawahnya.



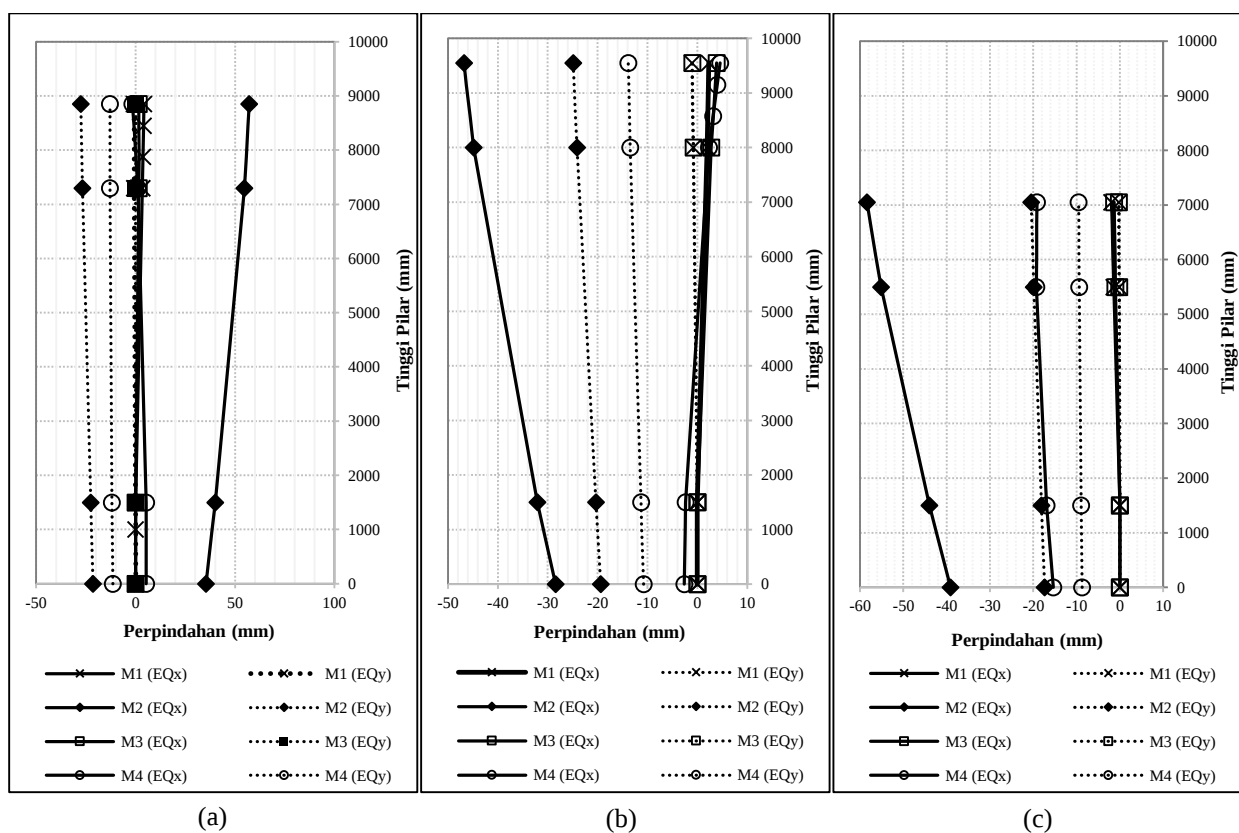
Gambar 7: Implementasi pegas pada model tiang fondasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Perpindahan Lateral Puncak Pilar

Tabel 2: Perbandingan perpindahan puncak pilar 1, pilar 3, dan pilar 5 akibat beban gempa.

Model	Pilar 1			Pilar 3			Pilar 5		
	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]	Dx [mm]	Dz [mm]	Dy [mm]	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]
1	4.15	-0.84	-0.18	2.32	-1.09	-0.19	-1.92	-0.24	-0.14
2	57.20	-27.57	-1.22	-46.80	-24.90	-1.21	-58.41	-20.50	-1.18
3	1.68	0.14	-0.18	3.86	-1.02	-0.19	-1.32	-0.24	-0.14
4	-1.56	-12.89	-1.19	4.59	-13.84	-1.21	-19.13	-9.51	-1.18



Gambar 8: Perbandingan perpindahan lateral (a) pilar 1, (b) pilar 3, dan (c) pilar 5.

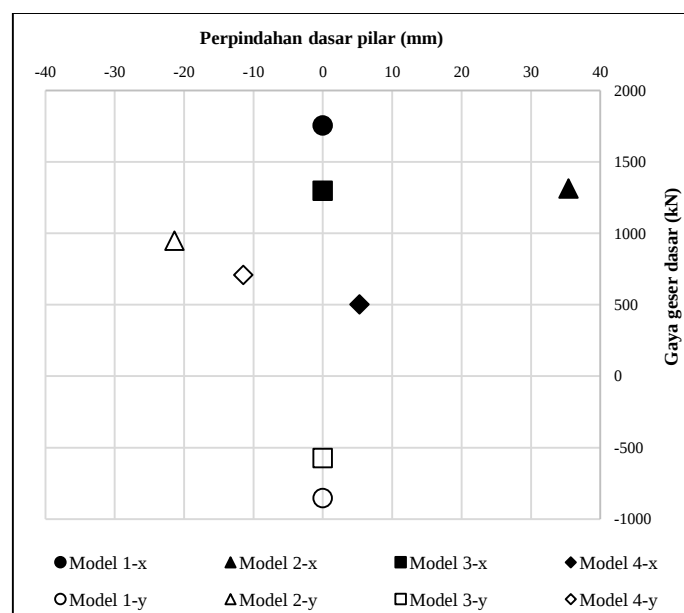
Analisis komparatif antara Model 1 (*fixed-base*) dan Model 2 (dengan SSI) secara jelas menunjukkan bahwa efek Interaksi Tanah-Struktur (SSI) secara konsisten memperbesar perpindahan lateral pada puncak pilar. Fenomena ini paling nyata terlihat pada Pilar 1, di mana perpindahan pada sumbu x (Dx) meningkat drastis dari 4,15 mm menjadi 57,20 mm, menunjukkan amplifikasi lebih dari 13 kali lipat. Amplifikasi yang serupa juga diamati pada Pilar 3, dengan perpindahan (Dx) yang melonjak tajam dari 2,32 mm menjadi -46,80 mm, mengindikasikan peningkatan lebih dari 20 kali lipat. Peningkatan paling signifikan teramati pada Pilar 5, di mana perpindahan (Dx) mengalami lonjakan ekstrem dari -1,92 mm menjadi -58,41 mm, menunjukkan amplifikasi yang luar biasa, yaitu lebih dari 30 kali lipat.

Peningkatan signifikan ini terjadi karena fleksibilitas tambahan yang diberikan oleh pondasi dan tanah dalam model SSI. Berbeda dengan model perletakan jepit yang kaku, model SSI mengakomodasi deformasi, translasi, dan rotasi. Fleksibilitas ini secara efektif mengurangi kekakuan sistem, memperpanjang periode getar alami, dan pada akhirnya meningkatkan respons perpindahan struktur secara keseluruhan dibandingkan dengan asumsi pondasi kaku.

Perbandingan Perpindahan Lateral Puncak Pilar

Tabel 3: Perbandingan gaya dalam dasar pilar 1 akibat beban gempa.

Model	Axial [kN]	Shear-y [kN]	Shear-x [kN]	Torsion [kN.m]	Momen-y [kN.m]	Momen-x [kN.m]
Utuh <i>Fixed Base</i>	-5903.25	-851.59	1754.82	113.93	8475.43	6001.18
Utuh SSI	3797.42	948.27	1313.95	-262.56	1522.14	-3167.97
Substruktur <i>Fixed Base</i>	-5900	-572.84	1298.45	113.93	5718.37	-4408.17
Substruktur SSI	3798.27	708.76	502.85	-262.56	-2056.82	-1851.98



Gambar 9: Perbandingan gaya geser dan perpindahan lateral dasar pilar 1 akibat gempa.

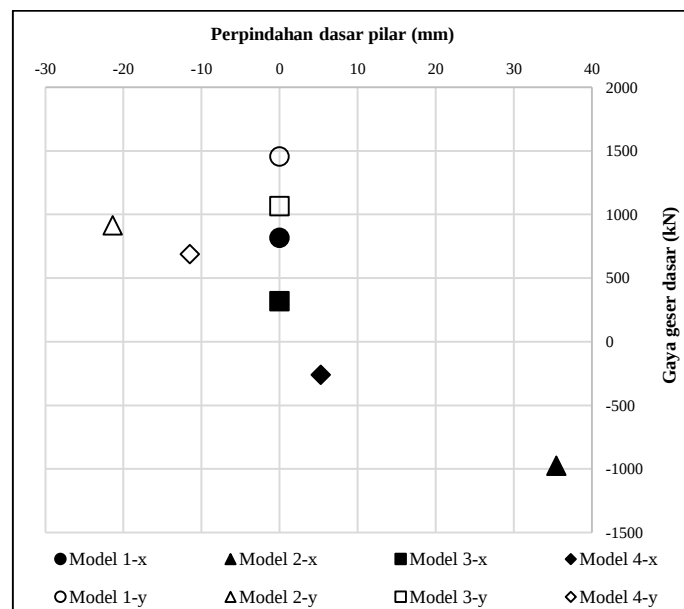
Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 9, analisis komparatif antara model utuh dan substruktur mengungkapkan perbedaan mencolok pada gaya dan perpindahan. Perbandingan model utuh, khususnya antara Model 1 (*fixed-base*) dan Model 2 (dengan SSI), menunjukkan bahwa efek Interaksi Struktur-Tanah (SSI) secara signifikan mengubah besaran dan arah gaya. Sebagai contoh, gaya *Shear-y* mengalami pembalikan arah, berubah dari -851.59 kN menjadi 948.27 kN.

Pada model substruktur, perbandingan Model 3 (*fixed-base*) dan Model 4 (dengan SSI) juga memperlihatkan perubahan yang substansial. Gaya *Shear-x* pada model ini mengalami pengurangan drastis,

dari 1298.45 kN menjadi 502.85 kN. Secara umum, Model 4 (Substruktur-SSI) cenderung menghasilkan gaya yang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan Model 1 (Utuh-Fixed).

Tabel 4: Perbandingan gaya dalam dasar pilar 3 akibat beban gempa.

Model	Axial [kN]	Shear-y [kN]	Shear-x [kN]	Torsion [kN.m]	Momen-y [kN.m]	Momen-x [kN.m]
Utuh <i>Fixed Base</i>	-5781.77	1455.49	816.43	83.7	3783.2	11704.75
Utuh SSI	3762.74	915.79	-972.5	47.76	-1086.43	-2935.4
Substruktur <i>Fixed Base</i>	-5780.09	1067.59	318.75	0.08	3041.78	10196.95
Substruktur SSI	3762.69	688.88	-260.43	47.76	1554.73	-1485.01



Gambar 10: Perbandingan gaya geser dan perpindahan lateral dasar pilar 3 akibat gempa.

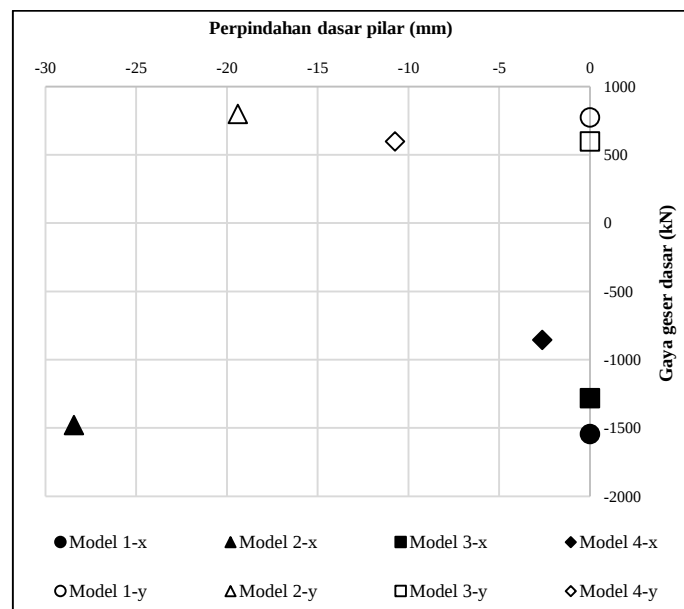
Hasil perbandingan antara model utuh dan substruktur berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 10 menunjukkan adanya perbedaan efek yang signifikan pada gaya dan perpindahan. Pada model utuh, perbandingan antara Model 1 (*fixed-base*) dan Model 2 (dengan SSI) menunjukkan bahwa efek Interaksi Struktur-Tanah (SSI) dapat mengubah gaya secara drastis. Sebagai contoh, gaya *Shear-x* pada Model 1 adalah 816.43 kN, namun pada Model 2 mengalami pembalikan arah menjadi -972.5 kN.

Perubahan serupa juga terlihat pada model substruktur. Perbandingan antara Model 3 (*fixed-base*) dan Model 4 (dengan SSI) menunjukkan bahwa gaya *Shear-y* berkurang dari 1067.59 kN menjadi 688.88 kN, sedangkan gaya Torsi meningkat dari 0.08 kN.m menjadi 47.76 kN.m. Secara keseluruhan, pemodelan substruktur dengan SSI (Model 4) cenderung menghasilkan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan pemodelan utuh yang mengasumsikan perletakan jepit (Model 1), membuktikan bahwa asumsi perletakan kaku dapat menghasilkan desain yang terlalu konservatif. Namun demikian, adanya amplifikasi dan

perubahan arah pada beberapa komponen gaya menekankan bahwa mengabaikan efek SSI dapat berpotensi berbahaya.

Tabel 5: Perbandingan gaya dalam dasar pilar 5 akibat beban gempa.

Model	Axial [kN]	Shear-y [kN]	Shear-x [kN]	Torsion [kN.m]	Momen-y [kN.m]	Momen-x [kN.m]
Utuh <i>Fixed Base</i>	-5959.11	774.51	-1544.51	194.43	-6423.71	4723.36
Utuh SSI	3869.33	800.51	-1477.45	263.44	-2013.8	-3076.24
Substruktur <i>Fixed Base</i>	-5956.01	599.4	-1281.35	194.43	-5262.46	4501.7
Substruktur SSI	3869.36	599.56	-853.77	263.44	1080.61	-2118.84



Gambar 11: Perbandingan gaya geser dan perpindahan lateral dasar pilar 5 akibat gempa.

Hasil analisis Tabel 5 dan Gambar 11 menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada gaya dan perpindahan antara model utuh dan model substruktur. Pada pemodelan utuh, perbandingan antara Model 1 (*fixed-base*) dan Model 2 (dengan SSI) memperlihatkan bahwa efek Interaksi Struktur-Tanah (SSI) secara substansial mengubah besaran gaya. Sebagai contoh, gaya *Shear-y* mengalami peningkatan dari 774.51 kN menjadi 800.51 kN.

Perubahan serupa juga terlihat pada model substruktur. Perbandingan antara Model 3 (*fixed-base*) dan Model 4 (dengan SSI) menunjukkan bahwa gaya *Shear-x* berkurang drastis dari -1281.35 kN menjadi -853.77 kN. Secara umum, pemodelan substruktur yang menyertakan SSI (Model 4) cenderung menghasilkan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan pemodelan utuh yang mengasumsikan perletakan jepit (Model 1). Temuan ini menegaskan bahwa asumsi perletakan jepit dapat menyebabkan desain yang berlebihan (*over-conservative*), meskipun mengabaikan efek SSI dapat berpotensi membahayakan stabilitas struktur.

Evaluasi Akurasi Setiap Pemodelan Analisis

Berdasarkan hasil analisis, ditemukan perbedaan signifikan dalam akurasi dan konservatisme dari empat model struktural yang diuji.

1. Model 1 (Utuh - *Fixed Base*): Model ini dianggap terlalu konservatif dan tidak realistis karena mengabaikan Interaksi Tanah-Struktur (SSI) dengan mengasumsikan pondasi jepit. Hal ini menghasilkan estimasi perpindahan yang jauh lebih kecil (4.15 mm), meskipun menghasilkan momen lentur yang lebih besar. Pendekatan ini tidak akurat dalam mendistribusikan gaya internal, sehingga kurang efisien untuk desain.
2. Model 2 (Utuh - SSI): Model ini dinilai paling akurat dan direkomendasikan karena menganalisis struktur secara utuh dengan memperhitungkan efek SSI. Dengan merepresentasikan fleksibilitas tanah secara tepat, model ini berhasil menangkap amplifikasi perpindahan yang signifikan (57.20 mm) dan redistribusi gaya yang kompleks. Oleh karena itu, hasil dari model ini menjadi dasar yang paling aman dan andal untuk desain.
3. Model 3 (Substruktur - *Fixed Base*): Pendekatan ini dianggap paling tidak akurat. Kombinasi penyederhanaan jembatan menjadi pilar tunggal dengan asumsi pondasi jepit gagal total dalam merepresentasikan perilaku dinamis sistem. Hasil yang didapatkan tidak relevan dan tidak dapat digunakan untuk tujuan desain.
4. Model 4 (Substruktur - SSI): Meskipun menyertakan efek SSI, model ini dianggap keliru secara konseptual. Penerapan SSI pada substruktur yang terisolasi gagal menangkap respons dinamis dari sistem jembatan secara keseluruhan, yang mengakibatkan perpindahan yang diremehkan (-19.13 mm vs. -58.41 mm pada Model 2). Penggunaan model ini berpotensi sangat berbahaya karena dapat mengarah pada desain yang tidak aman (*under-designed*).

4. SIMPULAN

Berdasarkan analisis komparatif empat model struktur jembatan, dapat disimpulkan bahwa interaksi tanah-struktur (SSI) memiliki dampak signifikan dan krusial terhadap perilaku jembatan, terutama saat menghadapi beban gempa. Pengabaian SSI, seperti pada model *fixed base*, menyebabkan hasil yang tidak akurat dan berpotensi membahayakan desain. Hal ini terlihat jelas dari perbandingan model: model yang mempertimbangkan SSI secara signifikan menunjukkan perpindahan lateral yang jauh lebih besar karena fleksibilitas tanah memperpanjang periode getar alami struktur. Fenomena ini membuat model *fixed base* tidak aman (non-konservatif) karena meremehkan deformasi. Selain itu, SSI juga menciptakan redistribusi gaya internal yang kompleks, di mana asumsi *fixed base* bisa menjadi terlalu konservatif, atau bahkan berbahaya jika terjadi amplifikasi gaya, yang dapat mengarah pada desain yang tidak aman (*under-designed*). Oleh karena itu, Model 2 (Utuh - SSI) merupakan pendekatan paling akurat dan direkomendasikan untuk desain jembatan yang andal, karena mampu merepresentasikan perilaku struktural secara paling realistis.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9(February): 1–17.
- Güner, A. B. S., & Özgan, E. (2025). Statistical Analysis of Soil Parameters Affecting the Bearing Capacity and Settlement Behaviour of Gravel Soils. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(10): 1–22.
- Helmy Restia F., Syamsul Majid, Umami Chasanah, S. (2024). Desain Alternatif Struktur Atas Gedung Dormitory Putra Uin Maulana Malik Ibrahim 4 (Empat) Lantai Kampus 3 - Tahap II Malang - Jawa Timur. *Teknik Sipil Unpand*, 1(1): 52–62.
- Ju, S. H., Chiu, C. S., & Hsu, H. H. (2023). Studying the Settlement of OWT Monopile Foundations Using a T-Z Spring with the Torsional Effect. *Processes*, 11(2).
- Kabtamu, H. G., Peng, G., & Chen, D. (2018). Dynamic Analysis of Soil Structure Interaction Effect on Multi Story RC Frame. *Open Journal of Civil Engineering*, 08(04): 426–446.
- Liu, F., Ma, J., & Li, D. (2025). Lateral Load-Bearing Performance of a Long Pile in Layered Soils Based on the Modified Vlasov Foundation Model. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(4): 1–15.
- Meldi Suhatri. (2011). The comparison of soil-pile interaction and fixed base support for integral prestressed concrete box-girder bridge. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(28): 6580–6595.
- Munawir, A., Harimurti, & Sumarsono, Q. A. R. P. (2022). Lateral Load Capacity and p-Multiplier of Group Piles with Asymmetrical Pile Cap under Seismic Load. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(16).
- Najar, I. A., Ahmadi, R., Amuda, A. G., Mourad, R., Bendary, N. El, Ismail, I., Bakar, N. A., & Tang, S. (2025). Advancing soil-structure interaction (SSI): a comprehensive review of current practices, challenges, and future directions. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6(1).
- Poulos, H. G., & Ameratunga, J. (2022). a Practical Approach To Bridge Foundation Design. *Australian Geomechanics Journal*, 57(2): 71–92.
- Tehrani, S. A. H., Andersson, A., Zanganeh, A., & Battini, J. M. (2024). Dynamic soil–structure interaction of a three-span railway bridge subject to high-speed train passage. *Engineering Structures*, 301(September 2023): 117–296.
- Wu, J., Pu, L., & Zhai, C. (2024). A Review of Static and Dynamic p-y Curve Models for Pile Foundations. *Buildings*, 14(6).
- Xie, Y., Yuan, C., & Bai, W. (2023). A Simplified Analysis Method for Seismic Response of Pile Foundation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(22).
- Kementerian Perhubungan. (2012). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Jakarta: Kementerian Perhubungan.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 2833:2016: Perencanaan jembatan terhadap beban gempa*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1725:2016: Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.