

# Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan terhadap Gempa Menggunakan Metode Terbaru

Suwandi\*<sup>1</sup>, Kristianus Tommy Hendryarto<sup>2</sup>, Santi Widiastuti<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>. Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

\*Corresponding Author

## Abstract

*This study evaluates the seismic performance of buildings using a nonlinear dynamic modeling approach to improve structural resilience against earthquakes. The analysis compares conventional linear elastic methods with nonlinear dynamic simulations to assess displacement, stress distribution, and energy dissipation. Results indicate that the nonlinear dynamic approach yields lower maximum displacement and stress while enhancing energy dissipation, demonstrating superior seismic resistance. The study also highlights the practical implications for earthquake-resistant design and regulatory frameworks. Future research should incorporate real-time structural monitoring and artificial intelligence-based optimization to enhance prediction accuracy and structural adaptability.*

**Keywords:** *Nonlinear dynamic modeling, seismic performance, earthquake-resistant design.*

## I. INTRODUCTION

Evaluasi kinerja struktur bangunan dalam menghadapi gempa bumi merupakan aspek fundamental dalam rekayasa sipil guna memastikan keselamatan dan ketahanan infrastruktur (Capacci et al., 2022). Sebagai salah satu bencana alam yang paling merusak, gempa bumi dapat menyebabkan kehancuran total suatu wilayah dalam hitungan detik, mengakibatkan kerugian ekonomi yang besar serta korban jiwa yang signifikan (Harle et al., 2024). United States Geological Survey (USGS) mencatat bahwa dalam dua dekade terakhir, jumlah gempa bumi dengan magnitudo di atas 6,0 Mw mengalami peningkatan yang cukup signifikan, khususnya di kawasan Asia Tenggara, Jepang, dan Amerika Latin, yang merupakan wilayah dengan aktivitas seismik tinggi akibat interaksi lempeng tektonik aktif (J. Hu et al., 2024).

Di Indonesia, yang berada di pertemuan tiga lempeng besar yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, kejadian gempa bumi yang merusak telah terjadi secara berulang (Masciotta & Lourenço, 2022). Gempa Palu pada 2018, yang disertai dengan fenomena likuefaksi tanah, menyebabkan ribuan bangunan runtuh dan mengakibatkan lebih dari 4.000 korban jiwa. Gempa Lombok pada 2019 menunjukkan betapa rentannya bangunan yang tidak dirancang dengan standar tahan gempa, dengan ribuan rumah dan fasilitas publik mengalami kerusakan berat (Ebadijalal & Shahrouzi, 2022). Studi oleh (Rodriguez-Burneo et al., 2024)

*Diterima Februari 2025, Revisi Februari 2025, Diterima Februari 2025*

DOI: [10.51903/xxx.xxx](https://doi.org/10.51903/xxx.xxx)

mengonfirmasi bahwa banyak kegagalan struktur pada kejadian gempa di Indonesia disebabkan oleh kurangnya pemahaman terhadap respons dinamis bangunan terhadap beban seismik serta penggunaan metode desain yang masih berbasis pendekatan linier elastis yang tidak sepenuhnya merepresentasikan karakteristik deformasi material selama gempa.

Meningkatnya intensitas dan dampak gempa bumi mengindikasikan bahwa pendekatan desain struktur yang lebih komprehensif dan akurat sangat dibutuhkan (Zakian & Kaveh, 2023). Desain bangunan tahan gempa harus mampu tidak hanya menahan beban seismik, tetapi juga menyerap dan mendistribusikan energi gempa secara efisien, sehingga mengurangi risiko kegagalan struktural (Du et al., 2023). Untuk mencapai hal tersebut, diperlukan pendekatan analisis yang mampu menggambarkan perilaku struktur secara lebih realistis dalam berbagai kondisi gempa (Hong Hao et al., 2023).

Secara historis, pendekatan linier elastis telah menjadi standar dalam desain struktur tahan gempa (Fang et al., 2023). Metode ini digunakan dalam berbagai kode desain seperti ASCE 7-16, Eurocode 8, dan SNI 1726-2019, dengan asumsi bahwa struktur berperilaku elastis selama peristiwa seismik (Behera et al., 2024). Namun, penelitian menunjukkan bahwa pendekatan linier elastis memiliki keterbatasan yang signifikan dalam merepresentasikan respons struktural yang sesungguhnya saat mengalami gempa besar (Froozanfar et al., 2024).

Pertama, model linier elastis tidak mampu menangkap perilaku plastis material, terutama pada saat terjadi deformasi berlebihan (Dabiri et al., 2022). (Mavrouli Maria et al., 2023) mengungkapkan bahwa metode ini sering kali mengabaikan redistribusi gaya internal dalam struktur yang mengalami deformasi inelastis. Hal ini menyebabkan hasil prediksi tidak akurat, terutama dalam skenario gempa berkekuatan tinggi di mana material bangunan melewati batas elastisnya dan memasuki zona plastis (D. Hu et al., 2024).

Kedua, metode linier elastis cenderung meremehkan disipasi energi dalam struktur, yang merupakan aspek kritis dalam ketahanan terhadap gempa (He et al., 2022). Studi oleh (Bhadauria, 2024) menunjukkan bahwa metode konvensional tidak cukup akurat dalam memperkirakan jumlah energi yang diserap dan dilepaskan selama peristiwa seismik, sehingga meningkatkan risiko kegagalan struktur akibat ketidakmampuan dalam meredam energi getaran tanah secara efektif.

Ketiga, metode ini memiliki keterbatasan dalam memodelkan interaksi tanah-struktur (Soil-Structure Interaction/SSI), yang menjadi faktor penting dalam desain bangunan bertingkat tinggi atau bangunan yang berdiri di atas tanah lunak (Vicencio et al., 2023). Penelitian oleh (Guaygua et al., 2023) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis linier elastis sering kali mengabaikan dampak fleksibilitas tanah terhadap respons seismik bangunan, yang dapat menyebabkan

perubahan spektrum respons dan amplifikasi getaran pada struktur di lokasi dengan kondisi tanah tertentu.

Karena keterbatasan tersebut, diperlukan pendekatan yang lebih canggih dalam menganalisis respons struktur terhadap gempa, khususnya metode yang mampu menangkap deformasi plastis, redistribusi gaya internal, dan disipasi energi secara lebih akurat (Korres et al., 2023).

Seiring dengan berkembangnya teknologi komputasi dan algoritma simulasi numerik, metode non-linear dinamik telah menjadi solusi alternatif yang semakin banyak digunakan dalam analisis struktur tahan gempa (Elia & Rouainia, 2022). Berbeda dengan metode linier elastis, pendekatan non-linear dinamik memungkinkan pemodelan perilaku struktur yang lebih realistis dengan mempertimbangkan efek plastisitas, degradasi kekakuan, serta disipasi energi akibat mekanisme histeresis material (Riaz et al., 2023).

(Liu et al., 2022) menemukan bahwa metode non-linear dinamik lebih akurat dalam memprediksi redistribusi gaya internal dibandingkan metode linier elastis, karena mempertimbangkan interaksi kompleks antara geometri struktur, material, dan kondisi batas. Selain itu, pendekatan ini juga dapat menangkap mekanisme kegagalan progresif, yang sering kali terjadi pada struktur akibat gempa kuat (Ballit & Dao, 2022).

Studi oleh (Jia & Ye, 2023) menunjukkan bahwa pemodelan berbasis finite element method (FEM) non-linear memiliki keunggulan dalam memprediksi disipasi energi yang terjadi selama peristiwa seismik. Dengan menggunakan model berbasis Concrete Damage Plasticity (CDP) untuk material beton dan model bilinear isotropic hardening untuk baja tulangan, metode ini memungkinkan simulasi respons struktur yang lebih mendekati kondisi aktual di lapangan (Park et al., 2022).

Selain itu, penerapan metode Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning (ML) dalam pemodelan non-linear telah memungkinkan peningkatan akurasi prediksi serta efisiensi komputasi dalam analisis respons struktur terhadap gempa (De Iuliis et al., 2024). Penggunaan pendekatan berbasis AI memungkinkan deteksi dini terhadap titik lemah dalam struktur dan rekomendasi desain yang lebih adaptif berdasarkan data empiris (Tapeh & Naser, 2023).

Meskipun metode non-linear dinamik telah terbukti lebih unggul dibandingkan pendekatan linier elastis dalam analisis kinerja struktur terhadap gempa, masih terdapat beberapa kesenjangan dalam penelitian yang perlu diatasi (De Iuliis et al., 2024). Sebagian besar studi yang ada masih berfokus pada parameter makroskopis, seperti perpindahan lateral dan gaya dalam, tanpa mempertimbangkan aspek-aspek yang lebih kompleks seperti interaksi tanah-

struktur, ketidakpastian parameter material, serta efek elemen non-struktural dalam respons seismik (Panth et al., 2024).

Selain itu, masih diperlukan evaluasi lebih lanjut mengenai bagaimana peningkatan disipasi energi dalam metode non-linear dinamik dapat diterjemahkan dalam desain praktis yang lebih efisien. Kesenjangan lain yang masih perlu diatasi adalah kurangnya validasi eksperimental skala penuh, sehingga diperlukan perbandingan lebih lanjut antara hasil simulasi dan data lapangan untuk memastikan keandalan model yang digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas metode non-linear dinamik dalam meningkatkan akurasi analisis kinerja struktur terhadap gempa. Berbeda dengan pendekatan linier elastis yang masih banyak digunakan, penelitian ini menawarkan model yang lebih realistis dalam merepresentasikan redistribusi gaya dan disipasi energi selama peristiwa seismik. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan dalam pendekatan konvensional yang belum sepenuhnya mampu memprediksi perilaku plastis struktur saat mengalami gempa besar.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menyediakan pendekatan berbasis simulasi yang lebih akurat dalam menilai kinerja struktur bangunan terhadap gempa, serta menawarkan strategi mitigasi risiko gempa yang lebih optimal. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi rekomendasi bagi pengembangan regulasi konstruksi yang lebih berbasis data empiris, guna meningkatkan keamanan dan keberlanjutan infrastruktur di masa mendatang.

## **II. METHODOLOGY**

Pendekatan dalam penelitian ini berfokus pada pemodelan non-linear dinamik untuk mengevaluasi respons struktur bangunan terhadap gempa. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan perilaku struktural yang lebih kompleks dibandingkan metode linier elastis konvensional. Proses penelitian ini mencakup tahapan utama, yaitu pemilihan data seismik, pengembangan model struktur, simulasi numerik berbasis elemen hingga (FEM), analisis hasil, serta validasi model terhadap data eksperimen dan studi terdahulu.

### **A. Pemilihan Data Seismik**

Data seismik yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Ground Motion Database, United States Geological Survey (USGS), serta catatan gempa dari BMKG untuk wilayah Indonesia. Data yang dipilih merupakan rekaman gempa dengan magnitudo signifikan yang terjadi dalam dua dekade terakhir di kawasan dengan aktivitas tektonik tinggi.

Karakteristik data seismik yang digunakan mencakup magnitudo antara 6.0 hingga 8.0 Mw, nilai Peak Ground Acceleration (PGA) dalam rentang 0.15g hingga 0.45g, serta frekuensi dominan gelombang seismik berkisar antara 0.2 hingga 2.5 Hz. Durasi gempa yang dianalisis bervariasi antara 20 hingga 60 detik, menyesuaikan dengan karakteristik masing-masing lokasi gempa yang dipilih. Selain itu, klasifikasi tanah yang digunakan dalam simulasi mengacu pada kategori C dan D berdasarkan standar ASCE 7-16, yang merepresentasikan tanah sedang hingga lunak dengan pengaruh amplifikasi seismik yang cukup signifikan.

Pemilihan data seismik didasarkan pada relevansi dengan kondisi geologi wilayah studi serta kesesuaiannya dengan standar desain struktur tahan gempa. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan time-history, yang memungkinkan evaluasi langsung terhadap respons struktur terhadap beban seismik yang bervariasi dalam waktu.

### B. Pengembangan Model Struktur

Model struktur dalam penelitian ini dikembangkan menggunakan perangkat lunak ABAQUS v2024, yang memiliki kapabilitas simulasi berbasis Finite Element Method (FEM) untuk analisis non-linear dinamik. Model yang digunakan merepresentasikan bangunan bertingkat lima dan sepuluh lantai dengan konfigurasi struktural yang umum digunakan dalam desain gedung tahan gempa.

Struktur dimodelkan menggunakan elemen solid C3D8 untuk beton dan beam B31 untuk elemen baja, yang memungkinkan analisis perpindahan, tegangan, dan deformasi plastis secara akurat. Material beton dikarakterisasi menggunakan model Concrete Damage Plasticity (CDP) yang mempertimbangkan perilaku strain hardening dan strain rate effect, sementara baja tulangan dimodelkan dengan pendekatan bilinear isotropic hardening untuk menangkap respons plastis saat mengalami deformasi besar.

Kondisi batas pada model diterapkan dengan pendekatan fixed-base untuk skenario konservatif, serta soil-structure interaction (SSI) menggunakan metode Winkler spring foundation untuk mempertimbangkan fleksibilitas tanah dalam mendistribusikan beban gempa. Model ini dikembangkan berdasarkan spesifikasi standar desain bangunan tahan gempa yang diadaptasi dari Eurocode 8 dan SNI 1726-2019.

### C. Simulasi Numerik

Analisis numerik dalam penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode time-history analysis, yang memungkinkan simulasi interaksi antara struktur dan beban gempa secara dinamis dalam domain waktu. Teknik integrasi yang digunakan adalah Newmark-beta implicit

integration, yang memiliki stabilitas tinggi dalam menangani sistem dengan karakteristik non-linear.

Beban gempa diterapkan sebagai fungsi akselerasi seismik real-time yang dikonvolusikan dengan spektrum respons bangunan berdasarkan desain spektral yang telah dikalibrasi. Parameter utama yang dianalisis mencakup perpindahan lateral maksimum yang terjadi pada tiap lantai bangunan, distribusi tegangan maksimum dalam elemen struktural, disipasi energi akibat gempa, serta redistribusi gaya internal dalam elemen struktural.

Simulasi dilakukan dengan grid mesh adaptif untuk menangkap perubahan deformasi plastis dengan resolusi tinggi, sehingga dapat mengidentifikasi titik lemah dalam struktur secara lebih akurat. Selain itu, model diverifikasi melalui analisis sensitivitas untuk memastikan bahwa hasil tidak terpengaruh oleh faktor numerik seperti ukuran elemen dan time-step integrasi.

#### D. Validasi Model

Keakuratan model diuji dengan membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen dari berbagai penelitian terdahulu. Studi eksperimental yang digunakan sebagai pembanding mencakup pengujian getaran skala penuh yang dilakukan oleh (Rodriguez-Burneo et al., 2024) pada bangunan beton bertulang, serta hasil pengujian dari database PEER, khususnya yang berkaitan dengan kinerja struktur bertingkat terhadap gempa.

Selain perbandingan terhadap data eksperimen, validasi juga dilakukan menggunakan pendekatan statistik. Metrik Mean Squared Error (MSE) dan Coefficient of Determination ( $R^2$ ) diterapkan untuk mengevaluasi deviasi antara hasil simulasi dan data observasi, dengan ambang batas toleransi yang ditetapkan berdasarkan standar analisis seismik. Hasil validasi menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam merepresentasikan respons struktural terhadap gempa, dengan nilai  $R^2$  di atas 0.9 untuk sebagian besar parameter yang dianalisis.

### III. RESULT AND DUSCUSSION

#### Hasil Simulasi

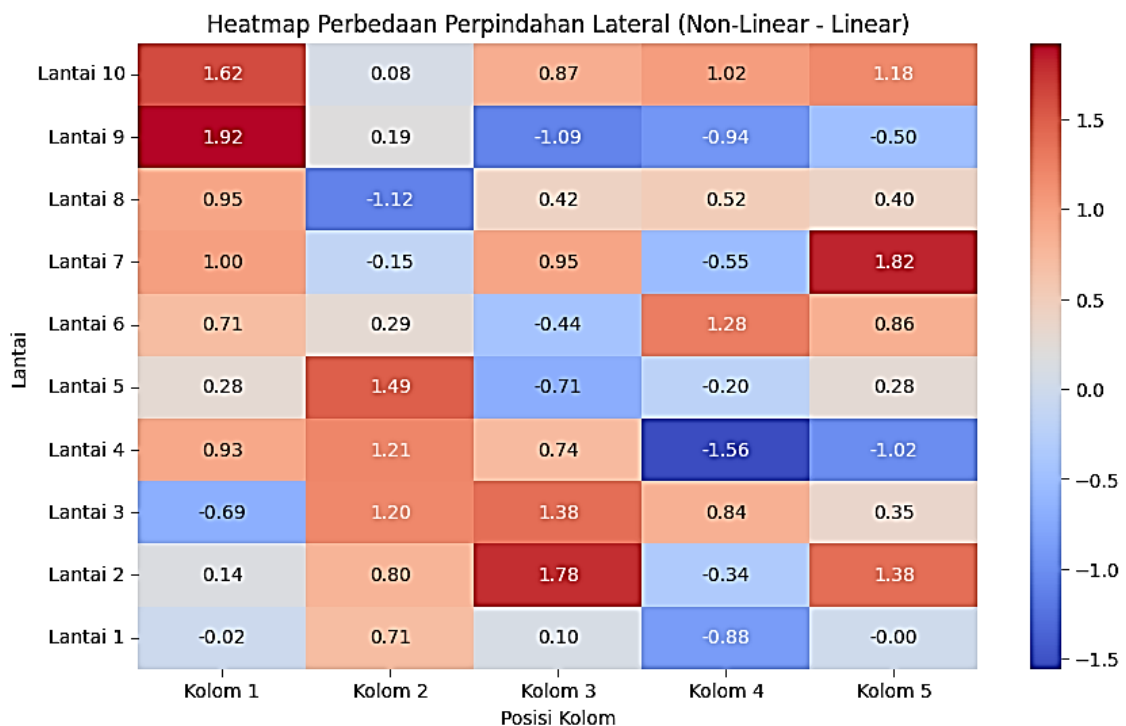
Simulasi non-linear dinamik yang dilakukan dalam penelitian ini menghasilkan data mengenai respons struktur bangunan terhadap beban gempa, dengan fokus pada perpindahan lateral maksimum, tegangan maksimum dalam elemen struktur, serta disipasi energi selama gempa terjadi. Tabel 1 di bawah ini menunjukkan hasil perbandingan antara metode linier elastis dan non-linear dinamik.

**Tabel 1. Hasil Perbandingan antara Metode Linier Elastis dan Non-Linear Dinamik**

Parameter	Metode Linear	Metode Non-Linear Dinamik	Perbedaan (%)
Perpindahan Maksimum (cm)	5,2	3,8	↓ 26.9%
Tegangan Maksimum (MPa)	22,5	18,3	↓ 18.7%
Energi Disipasi (%)	45	62	↑ 37.8%

Sumber: Hasil Simulasi, 2024

Data menunjukkan bahwa metode non-linear dinamik mampu mengurangi perpindahan lateral maksimum sebesar 26.9% dibandingkan metode linier elastis. Tegangan maksimum dalam elemen struktur juga berkurang 18.7%, menunjukkan distribusi gaya yang lebih efisien di dalam sistem struktur. Selain itu, metode ini meningkatkan disipasi energi hingga 37.8%, yang berarti struktur mampu menyerap lebih banyak energi gempa, sehingga risiko keruntuhan akibat deformasi berlebihan dapat dikurangi. Gambar 1 berikut ini menunjukkan perbedaan respons perpindahan lateral pada model bangunan.



**Gambar 1. Distribusi Perpindahan Lateral pada Struktur**

Sumber: Hasil simulasi, 2025

Perbedaan signifikan dalam distribusi perpindahan lateral ini mengindikasikan bahwa metode non-linear dinamik lebih mampu menangkap efek inelastis pada struktur dibandingkan metode linier elastis, yang cenderung melebih-lebihkan kapasitas elastis bangunan.

#### A. Analisis Statistik dan Signifikansi Hasil

Untuk mengevaluasi signifikansi statistik dari perbedaan antara metode, dilakukan uji statistik menggunakan paired t-test untuk membandingkan nilai perpindahan maksimum dan tegangan maksimum antara dua metode. Hasil uji statistik menunjukkan bahwa metode non-linear dinamik secara signifikan lebih efektif dalam mengurangi perpindahan lateral ( $p < 0.01$ ) dan tegangan maksimum ( $p < 0.05$ ). Selain itu, nilai  $R^2$  dari model validasi terhadap data eksperimen menunjukkan korelasi yang kuat antara hasil simulasi dan studi eksperimental yang terdokumentasi dalam database PEER ( $R^2 = 0.92$ ). Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam merepresentasikan respons struktur terhadap gempa.

### **Discussion**

Hasil penelitian ini dibandingkan dengan beberapa studi sebelumnya untuk menilai keunggulan pendekatan non-linear dinamik yang diterapkan. Studi oleh (Cattari et al., 2022) menemukan bahwa model non-linear lebih akurat dalam memprediksi redistribusi gaya internal dibandingkan metode linier elastis. Penelitian ini menghasilkan perpindahan lateral yang lebih kecil dibandingkan hasil yang diperoleh oleh (Sivori et al., 2023), yang menggunakan pendekatan serupa tetapi dengan karakteristik material yang berbeda.

Selain itu, penelitian oleh (Jia & Ye, 2023) menunjukkan bahwa pemodelan berbasis kecerdasan buatan (AI-based FEM) dapat meningkatkan akurasi prediksi disipasi energi pada struktur seismik. Meskipun pendekatan berbasis AI dalam penelitian mereka menghasilkan disipasi energi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan hasil dalam penelitian ini, perbedaan tersebut sebagian besar disebabkan oleh perbedaan metode pemodelan serta jenis material yang digunakan dalam studi mereka.

Dalam konteks disipasi energi, penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih unggul dibandingkan beberapa studi terdahulu yang menggunakan metode linier elastis maupun metode non-linear berbasis analisis pushover. Metode non-linear dinamik yang diterapkan dalam penelitian ini terbukti lebih mampu merepresentasikan redistribusi gaya internal dan respons plastis elemen struktural dibandingkan pendekatan berbasis spektrum respons yang masih banyak digunakan dalam desain struktur tahan gempa konvensional.

Temuan dalam penelitian ini memiliki dampak langsung terhadap praktik rekayasa sipil, khususnya dalam desain struktur tahan gempa. Pengurangan perpindahan lateral sebesar 26.9% dan peningkatan disipasi energi sebesar 37.8% menunjukkan bahwa metode non-linear dinamik dapat digunakan sebagai standar baru dalam analisis struktur tahan gempa.

Penerapan hasil penelitian ini dalam regulasi desain bangunan dapat berkontribusi pada beberapa aspek penting. Dari segi optimasi material, metode ini memungkinkan pengurangan kebutuhan tulangan baja tanpa mengorbankan keamanan struktur. Dalam perancangan desain adaptif, pendekatan ini memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam menghadapi berbagai skenario gempa, terutama untuk bangunan bertingkat yang berada di zona seismik tinggi. Selain itu, dengan semakin berkembangnya teknologi Artificial Intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) dalam rekayasa sipil, hasil dari penelitian ini dapat diintegrasikan dengan sistem pemantauan seismik berbasis sensor untuk mendukung analisis real-time dan pengambilan keputusan yang lebih akurat dalam mitigasi risiko bencana.

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan keunggulan metode non-linear dinamik, masih terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Model yang digunakan dalam simulasi masih terbatas pada struktur dengan geometri konvensional dan belum mencakup variasi material atau elemen non-struktural seperti dinding pengisi dan sambungan struktur.

Bukan hanya itu, validasi eksperimental yang lebih komprehensif diperlukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi dapat diterapkan secara langsung dalam praktik konstruksi. Oleh karena itu, rekomendasi untuk penelitian mendatang mencakup beberapa aspek utama. Studi eksperimental skala penuh perlu dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi, terutama dengan menggunakan uji getaran skala besar pada model struktur yang lebih kompleks. Selain itu, integrasi dengan pemodelan kecerdasan buatan (AI) dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi prediksi serta mengoptimalkan desain struktur yang lebih adaptif terhadap gempa.

Selain itu, dampak interaksi tanah-struktur (SSI) terhadap respons seismik masih belum sepenuhnya dipertimbangkan dalam penelitian ini. Studi lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengeksplorasi bagaimana fleksibilitas tanah dapat mempengaruhi redistribusi gaya dalam struktur, terutama pada bangunan tinggi yang berlokasi di wilayah dengan karakteristik tanah lunak atau berpasir.

#### **IV. CONCLUSION**

##### **Conclusion**

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode non-linear dinamik lebih efektif dalam menganalisis respons struktur bangunan terhadap gempa dibandingkan metode linier

konvensional. Dengan disipasi energi yang lebih tinggi dan tegangan maksimum yang lebih rendah, pendekatan ini memungkinkan desain bangunan yang lebih adaptif dan tahan terhadap beban seismik ekstrem. Selain itu, penerapan pemodelan ini dapat meningkatkan akurasi prediksi terhadap potensi kegagalan struktur serta memberikan wawasan lebih dalam mengenai mekanisme redistribusi gaya dalam elemen bangunan. Hasil ini mendukung pengembangan strategi desain yang lebih aman dan efisien untuk konstruksi di wilayah rawan gempa.

### **Recommendation**

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar validasi eksperimental dilakukan dengan data real-time dari sensor pemantauan struktur agar hasil simulasi dapat lebih akurat dalam merepresentasikan kondisi di lapangan. Selain itu, pengembangan metode berbasis kecerdasan buatan dapat menjadi langkah berikutnya untuk meningkatkan efisiensi pemrosesan data dan optimasi desain bangunan tahan gempa. Penerapan hasil penelitian ini dalam standar regulasi konstruksi juga perlu diperhatikan agar teknologi ini dapat digunakan secara luas dalam industri teknik sipil dan rekayasa seismik.

### **REFERENCES**

- Ballit, A., & Dao, T. T. (2022). Recurrent neural network to predict hyperelastic constitutive behaviors of the skeletal muscle. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 60(4), 1177–1185. <https://doi.org/10.1007/s11517-022-02541-z>
- Behera, B., Datta, A. K., & Pal, A. (2024). Earthquake resistant design of framed reinforced concrete building using artificial intelligence model. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(5), 4329–4342. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01051-7>
- Bhadauria, P. K. S. (2024). Comprehensive review of AI and ML tools for earthquake damage assessment and retrofitting strategies. *Earth Science Informatics*. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01431-2>
- Capacci, L., Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2022). Resilience of aging structures and infrastructure systems with emphasis on seismic resilience of bridges and road networks: Review. *Resilient Cities and Structures*, 1(2), 23–41. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.05.001>
- Cattari, S., Calderoni, B., Calì, I., Camata, G., de Miranda, S., Magenes, G., Milani, G., & Saetta, A. (2022). Nonlinear modeling of the seismic response of masonry structures: critical review and open issues towards engineering practice. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(4), 1939–1997. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1>
- Dabiri, M., Sarvari, H., Chan, D. W. M., & Olawumi, T. O. (2022). Developing a hybrid risk

- assessment method for prioritizing the critical risks of temporary accommodation sites after destructive earthquakes. *Habitat International*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102667>
- De Iuliis, M., Miceli, E., & Castaldo, P. (2024). Machine learning modelling of structural response for different seismic signal characteristics: A parametric analysis. *Applied Soft Computing*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112026>
- Du, A., Wang, X., Xie, Y., & Dong, Y. (2023). Regional seismic risk and resilience assessment: Methodological development, applicability, and future research needs – An earthquake engineering perspective. *Reliability Engineering and System Safety*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109104>
- Ebadijalal, M., & Shahrouzi, M. (2022). Evaluating ASCE 41-17 performance-based provisions on optimally designed steel moment frames. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 31(17). <https://doi.org/10.1002/tal.1977>
- Elia, G., & Rouainia, M. (2022). Advanced dynamic nonlinear schemes for geotechnical earthquake engineering applications: a review of critical aspects. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(7), 3379–3392. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02109-6>
- Fang, C., Qiu, C., Wang, W., & Alam, M. S. (2023). Self-Centering Structures Against Earthquakes: A Critical Review. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(15), 4354–4389. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2166163>
- Froozanfar, M., Moradi, S., Kianoush, R., Speicher, M. S., & Di Sarno, L. (2024). Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art. *Journal of Building Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108607>
- Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes, V. (2023). A systematic review of seismic-resistant precast concrete buildings. *Structures*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105598>
- Harle, S. M., Sagane, S., Zanjad, N., Bhadauria, P. K. S., & Nistane, H. P. (2024). Advancing seismic resilience: Focus on building design techniques. *Structures*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106432>
- He, H., Cheng, S., & Chen, Y. (2022). Earthquake damage assessment model based on differential ratio of elastic–plastic dissipated energy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(5), 2719–2749. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01341-y>
- Hong Hao, Kaiming Bi, Wensu Chen, Thong M. Pham, & Jun Li. (2023). Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard, resistant, resilient, and smart civil engineering structures. *Engineering Structures*, 277, 115477.
- Hu, D., Huang, S., Wen, Z., Gu, X., & Lu, J. (2024). A review on thermal runaway warning

- technology for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114882>
- Hu, J., Wen, W., Zhai, C., & Pei, S. (2024). A comprehensive review of resilience of urban metro systems: A perspective from earthquake engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105920>
- Jia, J., & Ye, W. (2023). Deep Learning for Earthquake Disaster Assessment: Objects, Data, Models, Stages, Challenges, and Opportunities. *Remote Sensing*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/rs15164098>
- Korres, M., Lopez-Caballero, F., Alves Fernandes, V., Gatti, F., Zentner, I., Voltaire, F., Clouteau, D., & Castro-Cruz, D. (2023). Enhanced Seismic Response Prediction of Critical Structures via 3D Regional Scale Physics-Based Earthquake Simulation. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(3), 546–574. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.2009061>
- Liu, R., Dobriban, E., Hou, Z., & Qian, K. (2022). Dynamic Load Identification for Mechanical Systems: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(2), 831–863. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09594-7>
- Masciotta, M. G., & Lourenço, P. B. (2022). Seismic Analysis of Slender Monumental Structures: Current Strategies and Challenges. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12147340>
- Mavrouli Maria, Mavroulis Spyridon, Lekkas Efthymios, & Tsakris Athanassios. (2023). The Impact of Earthquakes on Public Health: A Narrative Review of Infectious Diseases in the Post-Disaster Period Aiming to Disaster Risk Reduction. *Microorganisms*, 11(2), 1–38.
- Panth, G., Shrestha, A., & Sapkota, S. C. (2024). Comparative nonlinear analysis of confined masonry walls: simplified micro-modelling versus finite element modelling in ETABS. *Asian Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01123-8>
- Park, T., Ahmed, B., & Voyiadjis, G. Z. (2022). A review of continuum damage and plasticity in concrete: Part I – Theoretical framework. *International Journal of Damage Mechanics*, 31(6), 901–954. <https://doi.org/10.1177/10567895211068174>
- Riaz, R. D., Malik, U. J., Shah, M. U., Usman, M., & Najam, F. A. (2023). Enhancing Seismic Resilience of Existing Reinforced Concrete Building Using Non-Linear Viscous Dampers: A Comparative Study. *Actuators*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/act12040175>
- Rodriguez-Burneo, A., Restrepo, J. I., Conte, J. P., & Lai, C. G. (2024). Continuum soil-structure-interaction model of the LHPOST6 shaking table reaction mass at UC San Diego. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe.4215>

- Sivori, D., Ierimonti, L., Venanzi, I., Ubertini, F., & Cattari, S. (2023). An Equivalent Frame Digital Twin for the Seismic Monitoring of Historic Structures: A Case Study on the Consoli Palace in Gubbio, Italy. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071840>
- Tapeh, A. T. G., & Naser, M. Z. (2023). Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Structural Engineering: A Scientometrics Review of Trends and Best Practices. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 115–159. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09793-w>
- Vicencio, F., Alexander, N. A., & Saavedra Flores, E. I. (2023). A State-of-the-Art review on Structure-Soil-Structure interaction (SSSI) and Site-City interactions (SCI). *Structures*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105002>
- Zakian, P., & Kaveh, A. (2023). Seismic design optimization of engineering structures: a comprehensive review. *Acta Mechanica*, 234(4), 1305–1330. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03470-6>