

Pengaruh Tingkatan Gempa terhadap Nilai Kerugian Bangunan Dua Lantai Menggunakan Metode LSE dan RSA

Edwin Octavianto Saputra^{1),*)}, Zikra Fauzan Virawan²⁾, Aulia Rizky Akbarrina³⁾, M. Sufyan Tsaury⁴⁾, dan Abdul Muid⁵⁾

^{1), 2), 3), 4) 5), *)}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Lamongan, INDONESIA

^{*}Corresponding authors: edwinocta26@umla.ac.id

Diserahkan 01 Desember 2025. Direvisi 20 Desember 2025. Diterima 08 Januari 2025

ABSTRAK Bangunan dua lantai memiliki perilaku struktural yang unik saat mengalami gempa karena adanya kombinasi pengaruh beban statis dan dinamik pada tiap lantainya. Evaluasi nilai kerugian akibat gempa dilakukan dengan mempertimbangkan empat tingkatan intensitas, yaitu ringan, sedang, kuat, dan sangat kuat, menggunakan dua metode linier yang umum digunakan, yaitu *Linear Static Equivalent* (LSE) dan *Response Spectrum Analysis* (RSA). Metode LSE menghitung respons lateral bangunan dengan pendekatan beban statis ekuivalen sehingga analisisnya lebih sederhana dan cepat diterapkan, sedangkan RSA memperhitungkan kontribusi masing-masing mode getaran melalui spektrum respons gempa sehingga menghasilkan estimasi yang lebih realistis terhadap perilaku dinamik multi-mode. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai kerugian yang diprediksi menggunakan RSA lebih besar dibandingkan LSE pada tingkat gempa sedang hingga sangat kuat; sebagai contoh, kerugian pada gempa kuat menunjukkan peningkatan signifikan karena RSA mampu menangkap efek resonansi dan distribusi energi yang lebih kompleks dalam struktur. Hasil analisis juga mengindikasikan bahwa LSE cenderung memberikan nilai kerugian lebih rendah dan kurang sensitif terhadap perubahan intensitas gempa, sedangkan RSA memberikan gambaran kerusakan yang lebih rinci dan dekat dengan kondisi aktual. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan metode analisis yang tepat dalam estimasi kerugian seismik serta perlunya mempertimbangkan efek dinamik multi-mode untuk memperoleh prediksi risiko gempa yang lebih akurat, komprehensif, dan mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan struktur tahan gempa.

KATA KUNCI Analisis linier, Bangunan 2 lantai, Nilai kerugian, Tingkatan gempa,

ABSTRACT A two-story building exhibits unique structural behavior during an earthquake due to the combined effects of static and dynamic loads acting on each floor. The evaluation of earthquake-induced losses is carried out by considering four levels of seismic intensity—light, moderate, strong, and very strong—using two commonly applied linear analysis methods, namely the *Linear Static Equivalent* (LSE) method and the *Response Spectrum Analysis* (RSA). The LSE method calculates the lateral response of the building using an equivalent static load approach, making the analysis simpler and quicker to implement, whereas RSA accounts for the contribution of each vibration mode through the earthquake response spectrum, resulting in a more realistic estimation of multi-mode dynamic behavior. Based on the calculation results, the losses predicted using RSA are higher than those obtained from LSE, particularly for moderate to very strong earthquakes; for example, losses under strong-level earthquakes show a significant increase because RSA is able to capture resonance effects and more complex energy distributions within the structure. The analysis further indicates that LSE tends to produce lower loss values and is less sensitive to variations in seismic intensity, while RSA provides a more detailed damage representation that closely reflects actual conditions. These findings highlight the importance of selecting an appropriate analysis method for seismic loss estimation and emphasize the need to consider multi-mode dynamic effects in order to obtain more accurate and comprehensive earthquake risk predictions, supporting better decision-making in earthquake-resistant structural design.

KEYWORDS Earthquake levels, Linier analysis, Loss value, Two-story building

1. PENDAHULUAN

Bangunan dua lantai merupakan salah satu tipe konstruksi yang banyak dijumpai di kawasan perkotaan maupun perdesaan, dan meskipun termasuk bangunan rendah, struktur ini tetap rentan terhadap kerusakan akibat gempa bumi (Karima et al., 2021). Kerusakan dapat terjadi pada elemen struktural maupun non-struktural dan berdampak pada keselamatan penghuni, biaya perbaikan, serta hilangnya fungsi bangunan. Oleh karena itu, evaluasi risiko seismik dan estimasi nilai kerugian menjadi langkah penting dalam perencanaan struktur tahan gempa (Zuher et al., 2023). Estimasi kerugian dilakukan menggunakan fungsi kerugian yang dikalikan dengan nilai bangunan untuk memperoleh perkiraan kerugian moneter yang terukur dan konsisten. Dalam memprediksi respons bangunan terhadap gempa, dua metode linier yang umum diterapkan adalah *Linear Static Equivalent* (LSE) dan *Response Spectrum Analysis* (RSA) (Lumondang, Pradana

and Sangadji, 2022). LSE menggunakan pendekatan beban statik ekuivalen sehingga analisisnya lebih sederhana, sedangkan RSA mempertimbangkan kontribusi multi-mode berdasarkan spektrum respons gempa, sehingga mampu menangkap perilaku dinamik yang lebih kompleks (Mahendra and Ridwan, 2023). Perbandingan hasil dari kedua metode ini penting untuk melihat perbedaan estimasi kerugian yang muncul pada berbagai tingkatan intensitas gempa, mulai dari ringan, sedang, kuat, hingga sangat kuat.

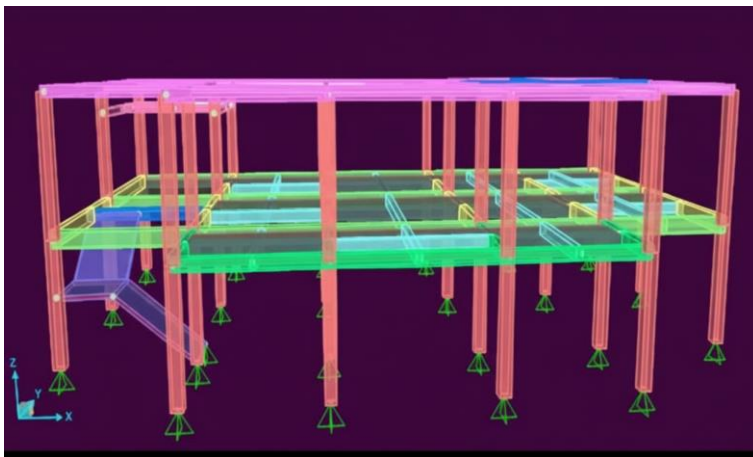
Meskipun kajian mengenai analisis gempa telah banyak dilakukan, research gap yang utama adalah minimnya penelitian yang secara khusus menganalisis perbedaan estimasi kerugian pada bangunan dua lantai antara metode LSE dan RSA. Banyak studi berfokus pada gedung bertingkat banyak atau struktur yang lebih kompleks, sedangkan struktur rendah dianggap memiliki respons sederhana sehingga efek multi-mode sering diabaikan (Simanjuntak and Tampubolon, 2022). Padahal, pada tingkat gempa tertentu, bangunan dua lantai tetap dapat menunjukkan respons dinamik yang signifikan dan memengaruhi besar kecilnya nilai kerugian (Fadzilah et al., 2021). Dalam konteks tersebut, novelty penelitian ini terletak pada integrasi antara analisis perilaku struktural dengan pendekatan estimasi kerugian moneter berbasis intensitas gempa untuk memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai potensi kerusakan (Nasution, Erizal and Fauzan, 2024). Pendekatan ini tidak hanya menyoroti perbedaan sensitivitas antara LSE dan RSA, tetapi juga memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai prediksi risiko seismik yang dapat digunakan untuk memperkuat strategi desain, mitigasi, serta pengambilan keputusan dalam perencanaan struktur tahan gempa bagi bangunan dua lantai (Al Huseiny and Nursani, 2024).

2. METODE

Analisis nilai kerugian bangunan dua lantai akibat gempa dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis. Tahapan ini meliputi pemodelan bangunan, input data gempa, penerapan metode analisis struktural linier, penentuan tingkatan gempa, dan perhitungan nilai kerugian berdasarkan fungsi yang sudah ditetapkan. Setiap tahap dirancang untuk menghasilkan estimasi respons struktur dan nilai kerugian yang kuantitatif dan konsisten. Rincian tahapan metode dijelaskan sebagai berikut:

2.1. Penyusunan Model Struktur

Pemodelan dilakukan berdasarkan keadaan eksisting bangunan dua lantai yang berlokasi di Kabupaten Klaten dengan panjang 26 meter, lebar 18 meter, dan tinggi total 8.85 meter hingga atap. Kondisi eksisting bangunan dapat terlihat pada Gambar 1, yang menunjukkan konfigurasi denah, sistem rangka, serta elemen kolom, balok, dan pelat yang digunakan. Properti material yang digunakan terdiri dari beton dengan kuat tekan sebesar 25 MPa dan baja tulangan dengan kuat leleh sebesar 360 MPa. Massa serta kekakuan tiap lantai dihitung berdasarkan kondisi aktual bangunan, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis gempa menggunakan metode linier.

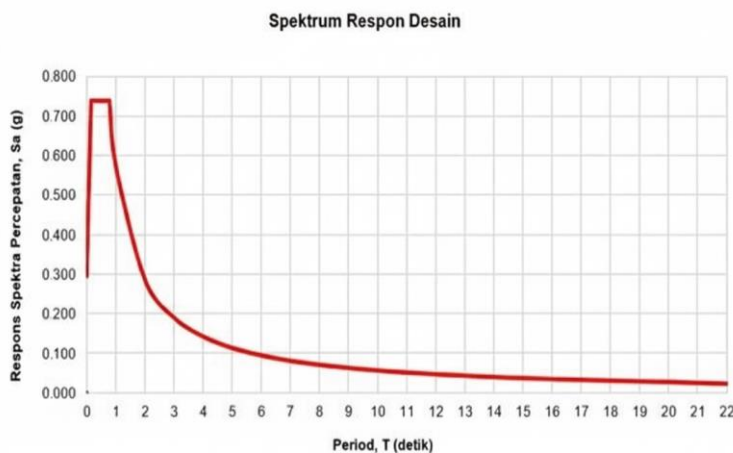


Gambar 1. Model Bangunan

2.2. Karakteristik Beban Seismik

Lokasi bangunan yang berada di Kabupaten Klaten termasuk dalam wilayah dengan potensi kegempaan sedang hingga tinggi berdasarkan Peta Gempa Indonesia. Berdasarkan hasil interpretasi dari peta tersebut, diperoleh nilai percepatan spektrum pendek (S_s) sebesar 1.008 g dan percepatan spektrum periode satu detik (S_1) sebesar 0.466 g. Nilai parameter

ini menunjukkan tingkat percepatan maksimum tanah pada periode yang berbeda, yang menggambarkan karakteristik respons dinamik tanah terhadap getaran gempa di wilayah Klaten. Kedua nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penentuan spektrum respons desain, yang menjadi acuan utama dalam analisis struktur terhadap beban gempa menggunakan metode *Linear Static Equivalent* (LSE) dan *Response Spectrum Analysis* (RSA).



Gambar 2. Kurva respons spektrum

Kurva hubungan antara percepatan desain dan periode getaran struktur yang menggambarkan karakteristik wilayah Klaten dapat dilihat pada Gambar 2. Kurva tersebut menunjukkan bahwa wilayah Klaten memiliki respons percepatan yang cukup tinggi pada periode menengah, yang berpotensi menimbulkan gaya inersia besar pada bangunan dua lantai. Oleh karena itu, penerapan parameter gempa ini dalam analisis struktural sangat penting untuk memperoleh hasil perhitungan gaya gempa dan nilai kerugian yang lebih representatif terhadap kondisi seismik sebenarnya di wilayah tersebut.

2.3. Analisis Perilaku Struktur

Analisis struktural dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (*finite element method*) untuk memperoleh respons yang akurat terhadap beban gempa pada bangunan dua lantai. Proses analisis mencakup pemodelan elemen struktur secara detail, meliputi kolom, balok, pelat lantai, serta kondisi tumpuan, agar perilaku deformasi dan distribusi gaya dapat digambarkan dengan baik. Perangkat lunak digunakan untuk menganalisis perilaku struktur melalui dua pendekatan linier, yaitu *Linear Static Equivalent* (LSE) dan *Response Spectrum Analysis* (RSA), yang memiliki prinsip dan asumsi berbeda dalam menggambarkan efek gempa. Pada metode LSE, beban gempa diterapkan dalam bentuk beban lateral statik ekuivalen yang dihitung berdasarkan massa bangunan dan percepatan desain gempa di wilayah Klaten untuk menggambarkan respons global struktur terhadap gaya inersia akibat gerakan tanah. Sementara itu, pada metode RSA, analisis dilakukan dengan mempertimbangkan spektrum respons desain, di mana gaya gempa diperoleh dari superposisi respons dinamis berbagai mode getar struktur.

2.4. Klasifikasi Intensitas Gempa

Penentuan tingkatan gempa dilakukan berdasarkan skala faktor terhadap gempa desain (*Design Basis Earthquake/DBE*) yang diperoleh dari peta percepatan respons wilayah Klaten. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (*finite element method*) melalui dua pendekatan linier, yaitu *Linear Static Equivalent* (LSE) dan *Response Spectrum Analysis* (RSA) dengan faktor pengali yang sama, yaitu 0.5 DBE untuk gempa ringan, 1.0 DBE untuk gempa sedang, 1.5 DBE untuk gempa kuat, dan 2.0 DBE untuk gempa sangat kuat (Zhafira, Taufiqy and Kusuma Anggraini, 2023)(Zhafira et al., 2023). Pada metode LSE, gaya gempa statik ekuivalen dihitung berdasarkan total berat struktur dikalikan dengan percepatan gempa rencana yang disesuaikan oleh faktor pengali tersebut untuk menghasilkan variasi gaya lateral sesuai tingkatan gempa (Abate, Evangelista and Tam, 2023), sedangkan pada metode RSA, penyesuaian tingkatan gempa tidak dilakukan dengan membuat spektrum baru, melainkan dengan penerapan *scale factor* langsung pada input kurva respons spektrum di dalam perangkat lunak (Ningrum, Nahak and Rasidi, 2022). Pendekatan ini memastikan bahwa kedua metode memiliki dasar pembebanan yang identik, sehingga hasil perbandingan antara respons struktur dan nilai kerugian bangunan dua lantai dapat dianalisis secara konsisten dan objektif.

2.5. Analisis Kerugian Gempa

Penentuan nilai kerugian dilakukan setelah level kinerja bangunan diketahui dari hasil analisis struktur menggunakan metode *Linear Static Equivalent* (LSE) dan *Response Spectrum Analysis* (RSA) pada berbagai tingkatan gempa, yaitu 0.5 DBE (ringan), 1.0 DBE (sedang), 1.5 DBE (kuat), dan 2.0 DBE (sangat kuat) (Liu et al., 2023). Setiap tingkatan gempa menghasilkan nilai simpangan antar lantai (*drift*) yang dibandingkan dengan batasan level kinerja seperti *Operational* (O), *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP) untuk menentukan tingkat kerusakan struktur (Rubini, Calvi and Gentile, 2025). Perhitungan nilai kerugian ekonomi dilakukan menggunakan fungsi kerugian yang telah ditetapkan dalam pedoman HAZUS, di mana setiap level kinerja memiliki persentase kerusakan tertentu terhadap nilai total bangunan (FEMA, 2024) Nilai persentase tersebut terlihat pada Tabel 1, yang menggambarkan besarnya potensi kerugian akibat penurunan kinerja struktur. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menghubungkan level kinerja struktur, intensitas gempa, dan besarnya kerugian ekonomi secara konsisten dan objektif sesuai standar internasional. Setelah level kinerja ditentukan, persentase kerusakan dari tabel kemudian dikalikan dengan nilai total bangunan untuk memperoleh nilai kerugian pada setiap tingkatan gempa, sehingga diperoleh hubungan yang jelas antara intensitas gempa, level kinerja struktur, dan besarnya kerugian ekonomi yang dialami bangunan dua lantai.

Tabel 1. Persentase nilai kerugian berdasarkan level kinerja struktur

Level Kinerja	Deskripsi Kondisi Struktur	Persentase Nilai Kerugian (% dari Nilai Bangunan)
<i>Operational</i> (O)	Struktur tetap berfungsi dengan kerusakan sangat kecil pada elemen non-struktural.	0 – 5 %
<i>Immediate Occupancy</i> (IO)	Struktur mengalami kerusakan ringan namun masih aman digunakan.	5 – 15 %
<i>Life Safety</i> (LS)	Struktur mengalami kerusakan sedang, beberapa elemen non-struktural rusak parah.	15–40%
<i>Collapse Prevention</i> (CP)	Struktur mengalami kerusakan parah dan hampir kehilangan kapasitas dukung, namun belum runtuh.	40–70%
<i>Near Collapse</i> (NC)	Struktur berada pada kondisi hampir runtuh total dengan deformasi ekstrem dan kehilangan fungsi	70 – 100 %

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian metode menjelaskan apa yang dilakukan untuk menjawab pertanyaan penelitian, menggambarkan bagaimana hal tersebut dilakukan, membenarkan desain eksperimental, dan menjelaskan bagaimana hasilnya dianalisis. Penulisan ilmiah bersifat langsung dan teratur. Dalam metode, penting untuk menjelaskan jenis penelitian; jenis data dan bagaimana data dikumpulkan dan/atau dipilih; bagaimana data dianalisis; alat atau bahan apa yang digunakan dalam penelitian; dasar pemilihan metode tersebut. Alasan memilih metode seharusnya didukung oleh referensi yang valid.

3.1. Hasil Analisis

Hasil analisis menggunakan metode *Linear Static Equivalent* (LSE) menunjukkan bahwa *drift ratio* pada arah sumbu-X dan sumbu-Y sama-sama mengalami peningkatan seiring meningkatnya tingkatan gempa, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Pada arah X, *drift ratio* bertambah dari 0,19% pada gempa ringan menjadi 0,37% pada gempa sedang, kemudian meningkat menjadi 0,55% pada gempa kuat, dan mencapai 0,72% pada gempa sangat kuat. Pola yang serupa terjadi pada arah Y, dengan nilai *drift ratio* mulai dari 0,29% (ringan), naik menjadi 0,58% (sedang), 0,86% (kuat), hingga 1,14% (sangat kuat). Peningkatan konsisten pada kedua arah ini mengindikasikan bahwa respons deformasi struktur semakin besar ketika tingkat intensitas gempa bertambah.

Tabel 2. *Drift ratio* arah sumbu-X dan arah Sumbu-Y (metode LSE)

Tingkatan Gempa	Arah Sumbu-X (%)	Arah Sumbu -Y (%)
Ringan	0,19	0,29
Sedang	0,37	0,58
Kuat	0,55	0,86
Sangat Kuat	0,72	1,14

Analisis dengan metode *Response Spectrum Analysis* (RSA) juga menunjukkan pola peningkatan drift ratio yang konsisten pada keempat tingkatan gempa, baik pada arah sumbu-X maupun sumbu-Y, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Pada arah X, *drift ratio* meningkat dari 0,55% pada gempa ringan menjadi 1,08% pada gempa sedang, kemudian bertambah menjadi 1,62% pada gempa kuat, dan mencapai 2,16% pada gempa sangat kuat. Pola serupa terlihat pada arah Y, di mana *drift ratio* bertambah dari 0,85% (ringan), 1,69% (sedang), 2,53% (kuat), hingga 3,57% (sangat kuat). Hasil ini menunjukkan bahwa RSA lebih sensitif dalam menangkap respons dinamis dan efek *multi-mode* yang dominan pada bangunan dua lantai.

Tabel 3. *Drift ratio* arah sumbu-X dan arah sumbu-Y (Metode RSA)

Tingkatan Gempa	Arah Sumbu-X (%)	Arah Sumbu -Y (%)
Ringan	0,55	0,85
Sedang	1,08	1,69
Kuat	1,62	2,53
Sangat Kuat	2,16	3,57

Perbandingan kedua metode pada tingkatan gempa kuat menunjukkan perbedaan *drift ratio* yang signifikan pada arah sumbu-X dan arah sumbu-Y. Pada arah X, metode LSE menghasilkan *drift ratio* sebesar 0,72%, sedangkan RSA memberikan nilai sebesar 2,16%. Sementara itu pada arah Y, LSE menghasilkan *drift ratio* 1,14% dan RSA mencapai 3,57%. Selisih yang besar pada kedua arah tersebut menunjukkan bahwa RSA memperkirakan deformasi struktur jauh lebih besar dibandingkan LSE untuk intensitas gempa yang sama. Variasi respons ini menegaskan bahwa analisis tingkat kinerja dan potensi kerugian pada subbab berikutnya akan mempertimbangkan hasil dari kedua metode secara bersamaan, sehingga evaluasi tidak bergantung pada satu pendekatan saja, tetapi mencakup gambaran respons struktur yang lebih komprehensif.

3.2. Level Kinerja Tingkatan Gempa

Berdasarkan evaluasi kinerja, terlihat pada Tabel 4 bahwa respons struktur pada arah sumbu-X dan sumbu-Y berbeda pada setiap tingkatan gempa serta bervariasi antara metode LSE dan RSA. Pada metode LSE, arah X menunjukkan level *Operational* pada gempa ringan dan sedang, kemudian berubah menjadi *Immediate Occupancy* (IO) pada gempa kuat dan sangat kuat, sedangkan arah Y berada pada *Operational* untuk gempa ringan, IO pada gempa sedang dan kuat, serta meningkat menjadi *Life Safety* (LS) pada gempa sangat kuat. Sementara itu, metode RSA memperlihatkan respons yang lebih besar, di mana arah X berada pada *Immediate Occupancy* (IO) pada gempa ringan, meningkat menjadi *Life Safety* (LS) pada gempa sedang dan kuat, dan mencapai *Collapse Prevention* (CP) pada gempa sangat kuat, sedangkan arah Y berada pada *Immediate Occupancy* (IO) pada gempa ringan, meningkat menjadi *Life Safety* (LS) pada gempa sedang, kemudian *Collapse Prevention* (CP) pada gempa kuat, dan mencapai kondisi *Near Collapse* (NC) pada gempa sangat kuat.

Tabel 4. Level kinerja struktur pada arah sumbu-X dan sumbu-Y (LSE dan RSA)

Tingkatan Gempa	LSE-Arah X	LSE-Arah Y	RSA-Arah X	RSA-Arah y
Ringan	Operational	Operational	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy
Sedang	Operational	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy	Life Safety
Kuat	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
Sangat Kuat	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention	Near Collapse

Selain itu, Tabel 4 juga membandingkan hasil kinerja struktur pada kedua arah tersebut berdasarkan dua metode analisis. Secara umum, LSE memberikan estimasi kinerja yang lebih konservatif pada gempa ringan dan sedang untuk arah X maupun Y, sedangkan RSA menunjukkan respons yang lebih detail, terutama pada gempa kuat dan sangat kuat, karena mempertimbangkan distribusi dinamis gaya gempa dan efek multi-mode pada kedua arah. Perbandingan ini menunjukkan bahwa kedua metode menghasilkan pola kinerja yang konsisten, namun RSA memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap perilaku aktual struktur, khususnya dalam menangkap eskalasi deformasi pada arah sumbu-X maupun sumbu-Y pada tingkat gempa yang lebih tinggi.

3.3. Perhitungan Nilai Kerugian

Perhitungan nilai kerugian dilakukan berdasarkan hubungan antara level kinerja struktur pada arah sumbu-X dan arah sumbu-Y pada tiap tingkatan gempa dan persentase kerusakan yang berpengaruh terhadap biaya perbaikan. Mengacu pada hasil level kinerja sebelumnya, masing-masing kategori gempa—ringan, sedang, kuat, dan sangat kuat—dihubungkan dengan nilai kerusakan komponen struktural maupun nonstruktural menurut kurva *fragility* dan dihitung menggunakan rumus estimasi kerugian berbasis *Loss Severity Estimate* (LSE) dikalikan dengan total nilai bangunan, baik untuk metode LSE maupun RSA. Hasil kuantitatif ini ditampilkan pada Tabel 5, yang memuat persentase kerusakan dan estimasi biaya kerugian pada setiap skenario gempa untuk kedua arah analisis. Secara umum, gempa ringan hanya memberi kerugian sangat kecil dengan dominasi kerusakan minor, sedangkan gempa sedang mulai menunjukkan kerugian menengah akibat deformasi dan retak struktural pada arah sumbu-X maupun sumbu-Y.

Tabel 5. Persentase kerusakan dan estimasi biaya kerugian pada arah sumbu-X dan arah sumbu-Y (LSE dan RSA)

Tingkatan Gempa	LSE-X (%)	LSE-X (Rp)	LSE-Y (%)	LSE-Y (Rp)	RSA-X (%)	RSA-X (Rp)	RSA-Y (%)	RSA-Y (Rp)
Ringan	1	41 juta	2	82 juta	5	205 juta	10	410 juta
Sedang	3	123 juta	5	205 juta	20	820 juta	25	1025 juta
Kuat	5	205 juta	8	328 juta	25	1025 juta	48	1968 juta
Sangat Kuat	10	410 juta	20	820 juta	45	1845 juta	70	2870 juta

Pada gempa kuat dan sangat kuat, nilai kerugian meningkat signifikan pada kedua metode karena struktur memasuki level kinerja *Life Safety* (LS) hingga *Collapse Prevention* (CP). Pada metode LSE, estimasi kerugian meningkat seiring deformasi pada arah sumbu-X dan sumbu-Y yang mulai memasuki level *Immediate Occupancy* (IO) hingga LS. Sementara itu, metode RSA menghasilkan nilai kerugian lebih tinggi karena mampu menangkap respons dinamis dan efek multi-mode yang lebih kompleks, sehingga deformasi dan kerusakan pada kedua arah lebih besar. Kondisi ini menimbulkan kebutuhan perbaikan signifikan pada elemen-elemen struktural penting, sehingga estimasi biaya meningkat tajam. Tabel 5 memperlihatkan perbandingan nilai kerugian antara LSE dan RSA, menegaskan bahwa pemilihan metode analisis berpengaruh langsung terhadap hasil estimasi kerugian. Hasil ini menjadi dasar penting dalam evaluasi risiko dan pengambilan keputusan terkait perbaikan dan penguatan struktur pada bangunan dua lantai.

4. KESIMPULAN

Analisis kerugian menunjukkan bahwa respons struktur pada arah sumbu-X dan sumbu-Y sangat dipengaruhi oleh tingkatan gempa. Gempa ringan menimbulkan kerugian relatif kecil, gempa sedang mulai menimbulkan kerugian menengah, sedangkan gempa kuat dan sangat kuat menghasilkan kerugian signifikan karena struktur memasuki level kinerja *Life Safety* (LS) hingga *Collapse Prevention* (CP). Perhitungan kerugian dilakukan pada kedua metode, yaitu LSE dan RSA, dengan estimasi biaya dihitung berdasarkan persentase kerusakan dikalikan total nilai bangunan. Perbedaan respons dan kerusakan pada kedua arah menegaskan pentingnya mempertimbangkan distribusi beban dan interaksi antar elemen struktural untuk mendapatkan estimasi kerugian yang akurat.

Perbandingan metode analisis menunjukkan bahwa estimasi kerugian yang diperoleh melalui RSA cenderung lebih tinggi dibandingkan LSE pada seluruh tingkatan gempa, mulai dari gempa ringan dan sedang hingga gempa kuat dan sangat kuat. Hal ini disebabkan RSA mampu menangkap respons dinamis struktur secara lebih rinci, termasuk efek multi-mode, distribusi deformasi, dan interaksi antar elemen struktural yang tidak sepenuhnya tercakup oleh pendekatan LSE yang berbasis beban statis ekuivalen. Akibatnya, estimasi kerugian dengan RSA memberikan gambaran yang lebih realistis dan representatif terhadap potensi kerusakan nyata pada bangunan dua lantai, sehingga metode ini menjadi acuan penting dalam evaluasi risiko, perencanaan mitigasi, dan pengambilan keputusan terkait perbaikan maupun penguatan elemen struktural pada setiap skenario gempa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan fasilitas selama penelitian ini, sehingga artikel ini dapat terselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- Abate, M., Evangelista, A.C.J. and Tam, V.W.Y., 2023. Comparative Response Spectrum Analysis on 15-and 50-Story Reinforced Concrete Buildings Having Shear Walls with and without Openings as per EN1998-1 Seismic Code. *Buildings*, 13(5), p.1303. <https://doi.org/10.3390/buildings13051303>.
- Fadzilah, M., Husni, H.R., Bayzoni, B. and Isneini, M., 2021. Evaluasi Kekuatan Struktur Gedung Bertingkat Akibat Pengaruh Beban Gempa Menggunakan Analisis Dinamik Respon Spektrum (Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro). *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 9(4), pp.885–898. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v9i4.2237>.
- FEMA, 2024. *Hazus Earthquake Model Technical Manual - Version 6.1*. Washington, D.C.
- Al Huseiny, M.S. and Nursani, R., 2024. Kajian Redesign Struktur Gedung 5 Lantai Balai Pengobatan Universitas Siliwangi. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 5(2). <https://doi.org/10.37058/aks.v5i2.10155>.
- Karima, F.A., Isneini, M., Sebayang, S. and Bayzoni, B., 2021. Analisis Struktur Gedung Bertingkat Rendah Akibat Pengaruh Beban Gempa Dengan Metode Riwayat Waktu. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 9(4), p.486386. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v9i4.2061>.
- Liu, X., Chen, J., Wang, H., Jia, Z. and Wu, Z., 2023. Earthquake Economic Loss Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Multiple Response Variables. *Buildings*, 13(7), p.1719. <https://doi.org/10.3390/buildings13071719>.
- Lumondang, A., Pradana, E.W. and Sangadji, S., 2022. Structural Capacity and Seismic Responses Evaluation of Low-Rise Buildings by Implementing Building Information Modeling (BIM) Framework. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 18(2), pp.177–185. <https://doi.org/10.21831/inersia.v18i2.53731>.
- Mahendra, A.A.B. and Ridwan, M., 2023. Perencanaan Konstruksi Bangunan Gedung Enam Lantai. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 5(1), pp.66–73. <https://doi.org/10.37058/aks.v5i1.7340>.
- Nasution, I.M., Erizal, E. and Fauzan, M., 2024. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat di Jakarta Menggunakan Pushover Analysis. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 9(2), pp.199–210. <https://doi.org/10.29244/jsil.9.2.199-210>.
- Ningrum, D., Nahak, A. and Rasidi, N., 2022. Comparison Analysis of Equivalent Static Earthquake and Spectrum Response Dynamics on Steel Structure. *Asian Journal Science and Engineering*, 1(2), pp.103–120. <https://doi.org/10.51278/ajse.v1i2.548>.
- Rubini, G., Calvi, G.M. and Gentile, R., 2025. Direct loss-based seismic retrofit of reinforced concrete frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(1), pp.327–357. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-02027-3>.
- Simanjuntak, P. and Tampubolon, S.P., 2022. Evaluasi respon seismik struktur bangunan Universitas Terbuka Palu terhadap gempa Sulteng 28 September 2018. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan-CENTECH*, 3(2), pp.119–129. <https://doi.org/10.33541/cen.v3i2.4561>.
- Zhafira, T., Taufiqy, I. and Kusuma Anggraini, N., 2023. Dynamic Analysis of Spectrum Response and Static Equivalent of The Semarang University College Building. *JCEBT (Journal of Civil Engineering, Building and Transportation)*, 7(1), pp.75–79. <https://doi.org/10.31289/jcebt.v7i1.8418>.
- Zuher, M.H., Nasution, A.P., Sidiq, Z.N., Masrilayanti, M. and Tanjung, J., 2023. Fragility assesment of mid-rise rc building using hazus method in high seismic zone. *Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain*, 1(2), pp.79–89. <https://doi.org/10.25077/jbkd.1.2.79-89.2023>.