

Model Prediksi Kerugian Bangunan Hunian Bertingkat Rendah Eksisting dengan Risiko Kegempaan Tinggi

Article History:

Received
22 Januari 2026
Revised
2 Februari 2026
Accepted
12 Maret 2026

JOESACK RENALDI SUGIANTO¹, YOSAFAT AJI PRANATA^{2*}

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, Indonesia

²Dosen Program Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, Indonesia

*Corresponding email: yosafat.ap@maranatha.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan model prediksi kerugian gempa untuk bangunan hunian bertingkat rendah eksisting pada wilayah dengan risiko kegempaan tinggi. Empat tipe rumah (A–D) dimodelkan sebagai Reinforced Masonry Walls (RM1) dan dianalisis menggunakan SAP2000 melalui analisis pushover berdasarkan FEMA 440 untuk memperoleh kurva kapasitas serta performance point. Parameter kurva kapasitas Hazus kemudian dimodifikasi menggunakan hasil pushover agar lebih merepresentasikan kondisi konstruksi lokal. Estimasi kerugian dilakukan dengan menghitung probabilitas tingkat kerusakan (damage state) dan loss ratio, lalu dikonversi menjadi kerugian moneter per unit bangunan. Hasil menunjukkan prediksi kerugian menggunakan Hazus orisinal relatif seragam antartipe, sedangkan Hazus modifikasi menghasilkan loss ratio lebih tinggi dan lebih sensitif terhadap perbedaan tipologi rumah. Model ini dapat digunakan sebagai alat skrining cepat untuk menentukan prioritas mitigasi/retrofit pada perumahan sejenis.

Kata kunci: Hazus, kerugian gempa, performance point, pushover

ABSTRACT

This study develops a seismic loss prediction model for existing low-rise residential buildings in a high-seismic-hazard area. Four house typologies (A–D) are classified as reinforced masonry walls (RM1) and analyzed in SAP2000 using FEMA 440 pushover procedures to obtain capacity curves and performance points. Hazus capacity curve parameters are then modified using the pushover results to better represent local construction characteristics. Seismic losses are estimated by computing damage state probabilities and loss ratios, which are converted into monetary losses per building unit. Results indicate that the original Hazus approach yields relatively uniform loss estimates across typologies, whereas the modified Hazus model produces higher and more typology-sensitive loss ratios. The proposed model can support rapid screening and prioritization of mitigation/retrofit measures for similar housing clusters.

Keywords: Hazus, seismic loss, performance point, pushover

This is an open-access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak di sepanjang Cincin Api Pasifik, yang dikenal dengan tingkat kegempaan yang sangat tinggi. Indonesia sering mengalami gempa besar. Total 7358 kali gempa bumi mengguncang Indonesia sepanjang tahun 2024 [1]. Wilayah seperti Jawa Barat, yang mencakup Bandung Barat, memiliki potensi kerusakan tinggi akibat gempa bumi, terutama karena adanya banyak sesar aktif di daerah tersebut. Dalam menghadapi risiko ini, mitigasi gempa yang efektif menjadi sangat penting untuk mengurangi kerugian fisik dan ekonomi yang mungkin timbul. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk mempersiapkan mitigasi adalah dengan melakukan estimasi kerugian gempa yang akurat.

Perumahan X, yang terletak di wilayah rawan gempa Bandung Barat, dipilih sebagai objek penelitian karena kawasan ini terdiri dari berbagai tipe bangunan bertingkat rendah yang menggunakan konstruksi lokal. Perumahan X mencakup beberapa tipe rumah dengan karakteristik struktural yang berbeda, dan ini memberikan kesempatan untuk mengkaji bagaimana estimasi kerugian gempa dapat dihitung berdasarkan kondisi bangunan yang ada di Indonesia. Rumah-rumah di Perumahan X mulai dibangun pada tahun 2020 dan menggunakan bahan serta teknik konstruksi yang berbeda dibandingkan dengan bangunan di negara-negara maju.

Metode Hazus, yang dikembangkan oleh *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), adalah alat yang dirancang untuk memperkirakan kerugian akibat gempa bumi berdasarkan berbagai faktor, termasuk tipe bangunan, kualitas konstruksi, dan kekuatan guncangan gempa [2]. Meskipun metode ini banyak digunakan di Amerika Serikat, penerapannya di Indonesia masih memerlukan penyesuaian, terutama pada parameter yang berkaitan dengan tipe bangunan dan konstruksi yang lebih sederhana. Bangunan di Indonesia, terutama yang menggunakan material lokal seperti bata, beton, dan kayu, memiliki karakteristik yang berbeda dengan bangunan yang lebih umum di negara maju, seperti yang berbahan baja atau beton bertulang.

Selain itu, sebagian besar bangunan bertingkat rendah di Indonesia tidak dirancang dengan

mempertimbangkan ketahanan seismik yang ketat. Sebuah studi oleh [3] mengungkapkan bahwa banyak bangunan di daerah rawan gempa di Indonesia tidak memenuhi standar perencanaan gempa yang memadai, yang menyebabkan bangunan tersebut lebih rentan terhadap kerusakan parah saat terjadi gempa besar. Oleh karena itu, penting untuk memodifikasi kurva kapasitas bangunan dalam model Hazus agar lebih sesuai dengan karakteristik bangunan lokal. Dalam penelitian ini, kurva kapasitas tersebut akan dimodifikasi dengan menggunakan hasil analisis pushover *multidirectional* yang lebih representatif untuk bangunan bertingkat rendah di Indonesia.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan estimasi kerugian gempa yang dihitung menggunakan metode Hazus standar dengan metode Hazus yang dimodifikasi, berdasarkan kurva kapasitas yang diperoleh dari analisis pushover *multidirectional* pada bangunan lokal di Indonesia.

Adapun ruang lingkup yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan pada Perumahan X, yang terdiri dari empat tipe rumah dengan karakteristik struktural yang berbeda.
2. Sendi plastis dimodelkan sesuai spesifikasi struktur kolom dan balok eksisting.
3. Bukaan dinding diperhitungkan untuk mereduksi kekakuan *strut* yang dimodelkan.
4. Dasar perhitungan yang digunakan adalah metode Hazus dengan modifikasi pada kurva kapasitas yang menggunakan metode *pushover*.
5. *Pushover* dilakukan secara *multidirectional* untuk mempertimbangkan asimetri bangunan.
6. Pemodelan dan analisis struktur dilakukan dengan menggunakan *software* Structural Analysis Program (*SAP2000*).
7. Beban yang diaplikasikan pada struktur merupakan beban mati (*D*), beban mati tambahan (*SDL*), beban hidup (*L*) menggunakan peraturan SNI 1727:2020 untuk pembebanan gravitasi dan SNI 1726:2019 untuk beban gempa.
8. Perhitungan kerugian merupakan kerugian penggantian dan perbaikan bangunan yang dihitung berdasarkan harga jual unit rumah.

9. Bangunan yang dihitung dalam penelitian ini belum pernah mengalami retrofit atau perbaikan seismik.
10. Hasil analisis berupa estimasi kerugian dan selisih antara perhitungan dengan metode orisinal Hazus dan metode modifikasi Hazus.

METODE

Metode Hazus

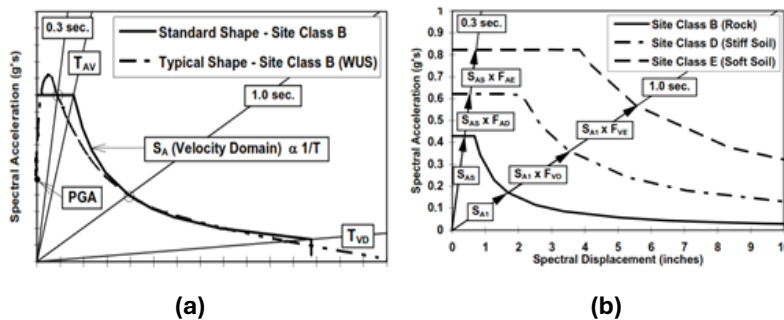
Hazus adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh FEMA di Amerika Serikat untuk memperkirakan kerugian akibat bencana alam, termasuk gempa bumi. Sejak diperkenalkan pada tahun 1992, Hazus telah digunakan secara luas untuk memodelkan dampak gempa terhadap bangunan dan infrastruktur, serta untuk mendukung perencanaan mitigasi bencana di seluruh dunia.

Dalam konteks gempa bumi, Hazus digunakan untuk memberikan estimasi kerugian fisik, ekonomi, dan sosial yang terjadi setelah terjadinya gempa, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis bangunan, kualitas konstruksi, dan karakteristik seismik suatu wilayah berdasarkan [4].

Hazus bekerja dengan mengintegrasikan berbagai data geospasial dan teknis untuk menganalisis potensi kerusakan gempa. Proses ini dilakukan dalam empat tahap utama: analisis bahaya, analisis struktur, analisis kerusakan, dan analisis kerugian [5].

Analisis Bahaya

Pada tahap pertama, Hazus menghitung potensi guncangan gempa berdasarkan parameter seismik lokal, yaitu S_a dan S_1 , kemudian digunakan untuk membuat respons spektra.



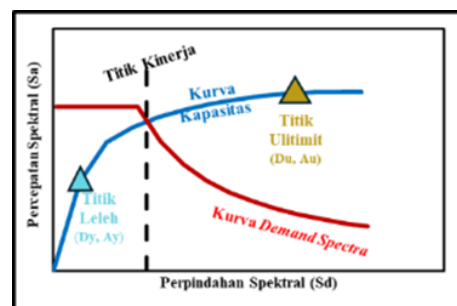
Gambar 1. (a) Respon spektra, (b) Demand spektra [6]

Parameter respons spektrum dikonversi menjadi parameter *demand spectra* (perpindahan spektral) menggunakan **Persamaan 1**, di mana S_D = perpindahan spektral (mm), S_A = percepatan spektral (g), dan T = periode untuk nilai tertentu (detik) sehingga terbentuk kurva.

$$S_D = 9,8 \times S_A \times T^2 \quad (1)$$

Analisis Struktur

Tahap kedua menganalisis kapasitas struktur bangunan untuk menahan beban gempa, yang didasarkan pada jenis bangunan dan material yang digunakan untuk menghasilkan (**Gambar 2**) kurva kapasitas yang kemudian disatukan dengan kurva *demand spectra* untuk menemukan titik kinerja (*performance point*).



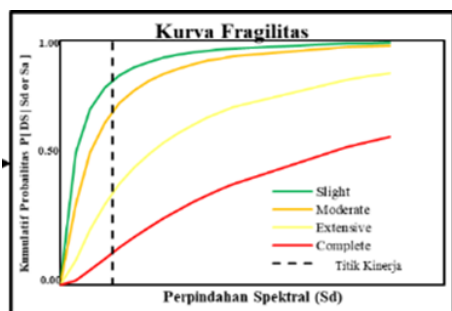
Gambar 2. Analisis struktur [6]

Kurva kapasitas bangunan dibuat dengan menggunakan titik kapasitas leleh yang telah disediakan, dan kapasitas ultimit dapat dilihat pada manual HAZUS dengan tingkat kode yang berbeda (*high code, moderate code, low code, pre code*).

Analisis Kerusakan

Pada tahap ini kurva fragilitas digunakan untuk mengestimasi kemungkinan kerusakan pada

struktur bangunan berdasarkan intensitas guncangan.



Gambar 3. Kurva fragilitas [6]

Kurva Fragilitas (FEMA, 2020)

Kurva fragilitas (**Gambar 3**) adalah fungsi probabilitas lognormal untuk kondisi kerusakan struktural dan nonstruktural (*slight, moderate, extensive, and complete*) yang akan dicapai atau dilampaui ketika perpindahan spektral (S_d) diberikan. Setiap kurva fragilitas dicirikan oleh median ($\bar{S}_{d,ds}$) dan standar deviasi lognormal (β_{ds}) seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan 2**, dimana $P[ds|S_d]$ adalah nilai probabilitas terlampaui dari perpindahan spektral dan tingkat kerusakan yang ditinjau, dan Φ adalah fungsi distribusi standar normal kumulatif [7].

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \times \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (2)$$

Analisis Kerugian

Pada tahap terakhir, metode HAZUS menghitung komponen kerugian ekonomi langsung akibat gempa yang meliputi biaya perbaikan gedung, kerugian isi gedung, kerugian inventaris gedung, biaya relokasi, kerugian pendapatan, kerugian pendapatan sewa, dan kerugian upah. Seluruh komponen kerugian dihitung berdasarkan analisis tahap sebelumnya. Biaya perbaikan struktur ($CS_{ds,i}$) dihitung pada **Persamaan 3**, dimana BCR_i adalah biaya penggantian gedung, $PMBTSTR_{ds,i}$ adalah probabilitas struktur untuk keadaan rusak pada tiap tingkat kerusakan struktural untuk skenario single hazard yang ditinjau, $RCS_{ds,i}$ adalah rasio biaya perbaikan struktural yang dinyatakan dalam % BCR_i . Nilai probabilitas suatu struktur berada dalam keadaan rusak struktural dapat dilihat pada manual Hazus.

$$CS_{ds,i} = BCR_i \times \sum_{i=1}^{33} PMBTSTR_{ds,i} \times RCS_{ds,i} \quad (3)$$

Analisis Pushover

Analisis *pushover* adalah metode analisis nonlinier yang digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktural bangunan ketika dikenakan beban seismik. Pada metode ini, beban gempa diterapkan secara bertahap hingga struktur mencapai kegagalan, dengan tujuan untuk memahami bagaimana bangunan akan berperilaku pada berbagai tingkat deformasi. Dalam analisis *pushover*, beban lateral yang mewakili gempa ditingkatkan secara sistematis pada struktur dan menghasilkan kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya lateral dan perpindahan struktur [8].

Analisis *pushover* umumnya dilakukan dalam satu arah (misalnya arah X), namun pada struktur yang lebih kompleks dan rentan terhadap beban gempa dari berbagai arah, analisis *multidirectional* sangat dianjurkan. *Pushover multidirectional* memberikan gambaran yang lebih realistis tentang bagaimana struktur akan bereaksi terhadap gempa yang terjadi di berbagai arah, yang sering kali dapat menyebabkan kerusakan lebih serius jika dibandingkan dengan hanya mempertimbangkan satu arah saja.[9] Penelitian dari [10] juga menyebutkan bahwa dalam banyak kasus, struktur bangunan tidak hanya mengalami beban dalam satu arah (seperti arah horizontal), tetapi juga dalam arah lainnya, yang menyebabkan distribusi gaya seismik yang lebih kompleks dan dapat memengaruhi distribusi kerusakan.

Pemodelan Strut

Pemodelan strut dalam analisis gempa adalah pendekatan yang digunakan untuk menggambarkan elemen struktural seperti dinding yang memiliki peran penting dalam mengalihkan beban lateral yang diterima oleh bangunan selama gempa. Dinding pengisi berfungsi untuk meningkatkan kekakuan bangunan terhadap gaya lateral, namun sering kali peran ini tidak diperhitungkan secara memadai dalam model konvensional [11]. Pada dasarnya, model ini menggambarkan dinding sebagai elemen batang kaku dengan diameter tertentu yang mengalirkan beban ke elemen struktur lainnya, seperti kolom dan balok [12].

Berdasarkan [11] perhitungan struktur diagonal ekuivalen dilakukan melalui **Persamaan 4** hingga **Persamaan 5**, dimana λ_1 adalah koefisien untuk menentukan lebar ekuivalen

dari *strut* dinding, E_{me} adalah modulus elastisitas dari tekan batu bata, E_{fe} adalah modulus elastisitas dari material rangka pendukung, t_{inf} adalah tebal dari dinding, h_{inf} adalah tinggi dari dinding, I_{col} adalah momen inersia dari kolom, L_{inf} adalah panjang dari dinding, dan a adalah lebar struktur *strut* ekuivalen lebar dari dinding:

$$\lambda_1 = \left(\frac{E_{me} \times t_{inf} \times \sin(2\theta)}{4 \times E_{fe} \times I_{col} \times h_{inf}} \right)^{0,25} \quad (4)$$

$$a = 0.175 \times (\lambda_1 \times h_{col})^{-0.4} \times L_{diag} \quad (5)$$

Dinding bata berlubang (pintu/jendela) dimodelkan sebagai *strut* diagonal ekuivalen menggunakan pendekatan [13] dengan modifikasi reduksi luas efektif pada **Persamaan 6**:

$$A_{eff} = A \left(1 - \frac{\text{Luas Bukaannya}}{\text{Luas Total Dinding}} \right) \quad (6)$$

Bukaan diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu kecil (<10%) direduksi 10% kekakuan aksial, sedang (10–20%) direduksi 25% kekakuan, dan besar (>20%) direduksi 40% kekakuan.

Pemodelan Sendi Plastis

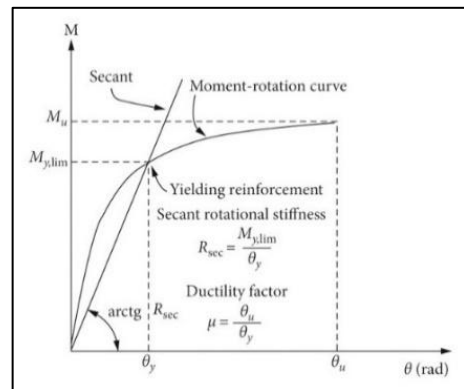
Pemodelan *strut* dalam analisis gempa menggunakan sendi plastis (*plastic hinges*) sebagai titik di mana elemen struktural, seperti kolom atau balok, mulai mengalami deformasi permanen akibat pembebanan yang melebihi kapasitas elastiknya. Dalam konteks gempa, sendi plastis memainkan peran penting dalam menggambarkan respons non-linear struktur terhadap beban seismik. Penelitian [8] mengatakan bahwa ketika sebuah struktur terpapar beban seismik yang cukup besar, elemen-elemen struktural akan mulai mengalami plastisitas, yang mengarah pada pengurangan kapasitas beban struktural dan peningkatan deformasi.

Perilaku sendi plastis direpresentasikan melalui kurva momen-rotasi ($M - \theta$) yang terdiri dari tiga fase utama dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Tiga fase utama tersebut adalah fase elastis, yaitu hubungan linier antara momen dan rotasi, fase leleh, yaitu pembentukan sendi plastis dimulai setelah melewati momen leleh (M_y), dan fase pasca-leleh, yaitu penurunan

kekakuan hingga mencapai rotasi ultimit (θ_u), diikuti oleh degradasi kapasitas [2].

Parameter kritis meliputi rotasi leleh (θ_y) yaitu titik awal perilaku nonlinier, rotasi ultimit (θ_u) yaitu batas deformasi sebelum keruntuhan, dan daktilitas ($\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y}$) yaitu ukuran ketahanan deformasi *inelastic* [15].

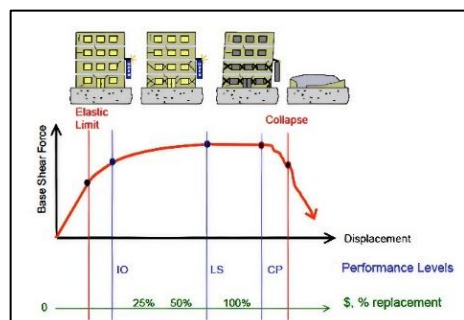


Gambar 4. Kurva momen rotasi [14]

Pada SAP2000, sendi plastis ditempatkan di lokasi kritis (ujung balok, dasar kolom) dengan properti berdasarkan kurva $M - \theta$ standar yang mengacu pada klasifikasi FEMA 356, dengan parameter IO (*Immediate Occupancy*), LS (*Life Safety*), dan CP (*Collapse Prevention*) seperti terlihat pada **Gambar 5**. Kemudian juga persamaan empiris, yaitu rotasi ultimit (θ_u) untuk elemen beton bertulang dihitung berdasarkan **Persamaan 7** yang diambil dari penelitian [8].

$$\theta_u = \theta_y + \psi L_p \left(1 - 0,5 \frac{L_p}{L_u} \right) \quad (7)$$

Dengan L_p adalah panjang sendi plastis, L_u adalah panjang geser, dan ψ adalah kurvatur limit.



Gambar 5. Kinerja sendi plastis [16]

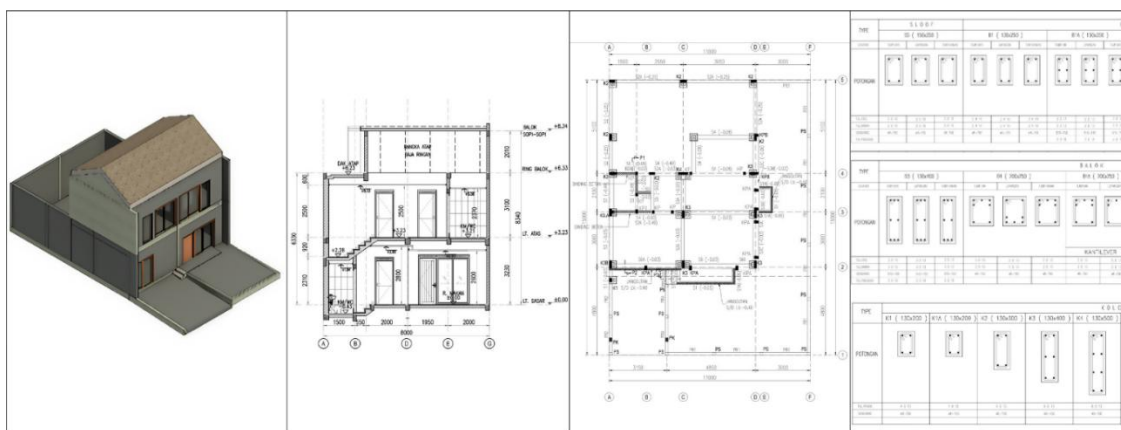
Studi Kasus

Studi kasus dalam penelitian ini adalah perumahan X di Kabupaten Bandung Barat (KBB), Jawa Barat. Perumahan X memiliki total 380 unit rumah, terdiri dari 4 tipe rumah, yaitu 290 unit tipe 94/120, 61 unit tipe 99/165, 23 unit tipe 133/220, dan 6 unit tipe 145/260. Data yang diperoleh dari tim pengembangan perumahan adalah *site plan*, *pricelist*, dan brosur. Data geometri didapat dengan survei dan pengukuran, sedangkan detail struktur

merupakan hasil perhitungan penulis berdasarkan [17], [18], dan [19].

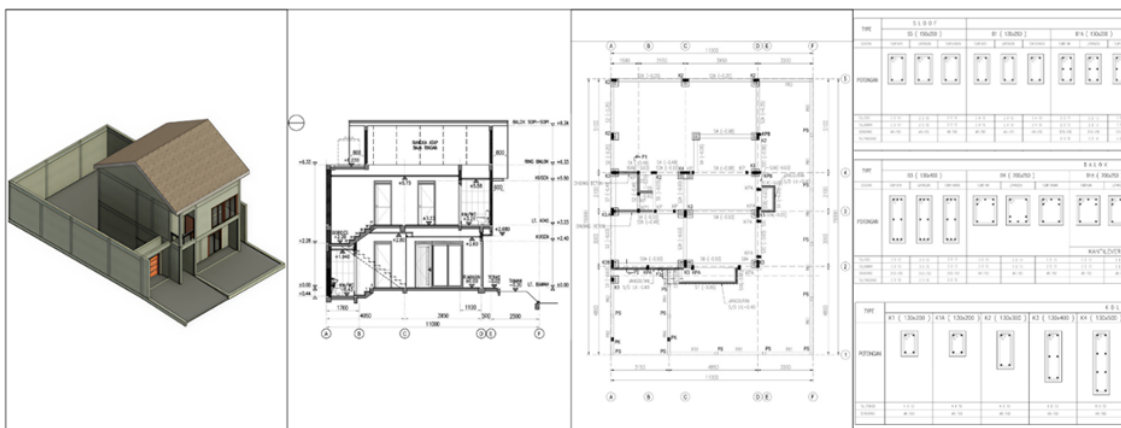
Tabel 1. Data properti rumah perumahan X

No	Tipe	Jumlah	Harga
1	A	290	Rp2.048.294.100
2	B	61	Rp2.523.906.900
3	C	23	Rp3.084.200.490
4	D	6	Rp3.617.139.240



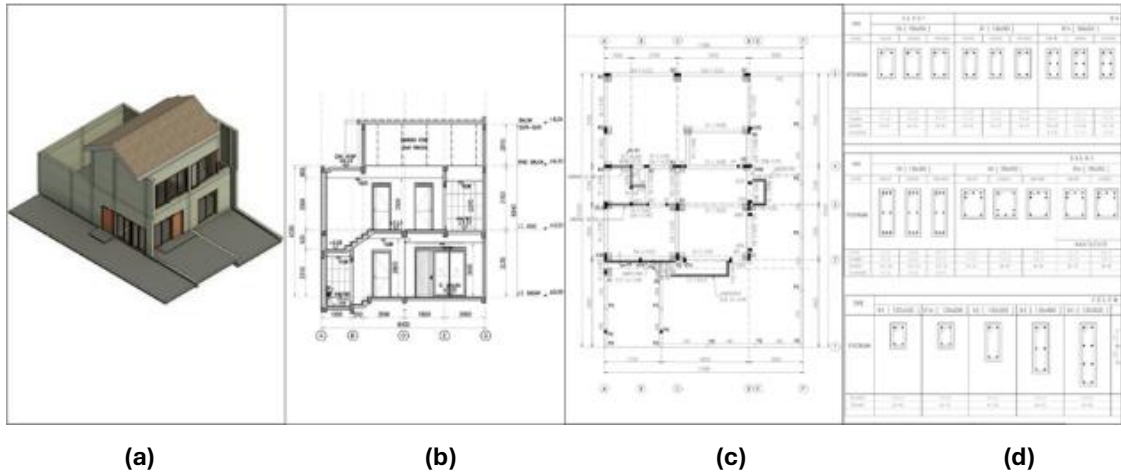
(a) (b) (c) (d)

Gambar 5. Data rumah tipe A: (a) pemodelan 3D Revit, (b) potongan bangunan, (c) denah struktur, (d) detail struktur

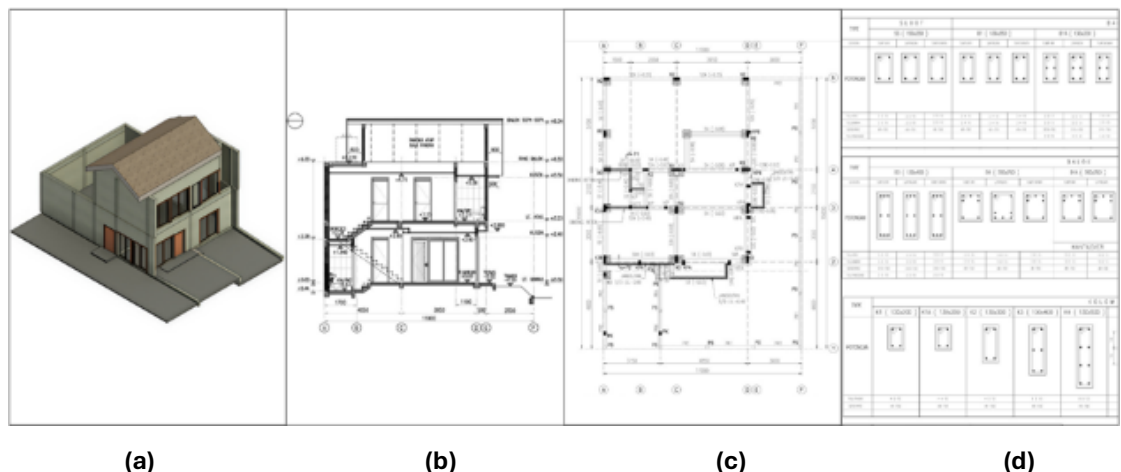


(a) (b) (c) (d)

Gambar 6. Data rumah tipe B: (a) pemodelan 3D Revit, (b) potongan bangunan, (c) denah struktur, (d) detail struktur



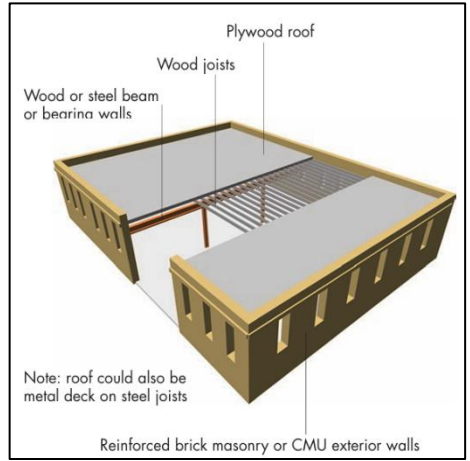
Gambar 7. Data rumah tipe C: (a) pemodelan 3D Revit, (b) potongan bangunan, (c) denah struktur, (d) detail struktur



Gambar 8. Data rumah tipe D: (a) pemodelan 3D Revit, (b) potongan bangunan, (c) denah struktur, (d) detail struktur

Semua rumah di perumahan X mulai dibangun pada tahun 2020. Empat tipe rumah tersebut terdiri dari 2 lantai, dengan tinggi lantai pertama dan kedua ditunjukkan pada **Tabel 1. Gambar 5 sampai dengan Gambar 8** menunjukkan data empat tipe rumah yang berupa pemodelan 3D, potongan bangunan, denah struktur, dan detail struktur. Berdasarkan wawancara dengan tim pengembang didapat informasi mutu beton $f'_c = 18,68$ MPa dan mutu tulangan baja $f_y = 240$ MPa.

Berdasarkan data struktur, sistem struktur dalam studi kasus ini diidentifikasi sebagai *Reinforced Masonry Walls (RM1)* sesuai dengan kriteria struktur [4] yang juga digunakan sebagai acuan dalam model Hazus.

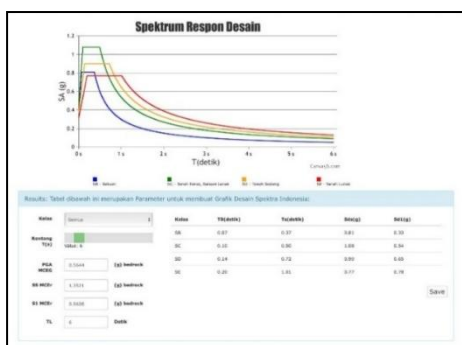


Gambar 9. Struktur Reinforced Masonry Walls (RM1) [6]

Tabel 2. Data parameter metode Hazus

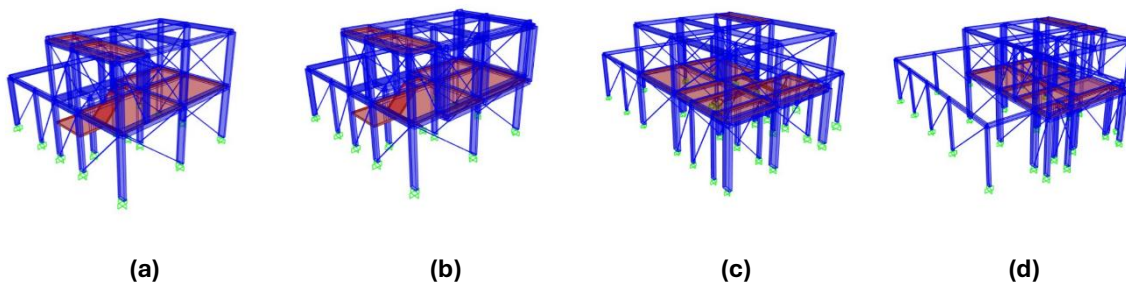
No	Analisis	Parameter	Sumber
1	Gempa	S_s, S_1, F_a, F_v	Peta Gempa Indonesia 2017 dan SNI 1726 : 2019
2	Struktur	A_y, D_y, A_u, D_u Kode Level	Manual Hazus Tabel 5.7 - Tabel 5.10 Tahun Konstruksi
3	Kerusakan	S_d, β_{ds}	Manual Hazus Tabel 5.12 - Tabel 5.21
4	Kerugian	RCS_{dsi}, BCR_i	Manual Hazus (RES1)

Parameter gempa rencana diambil dari peta respons spektra [20] untuk periode ulang 2500 tahun, dengan nilai $S_s=1,3489g$; $S_1=0,5600g$.



Gambar 10. Respon Spektra Perumahan X [20]

Analisis dinamik nonlinier pada studi ini mengacu pada [19] dengan spektrum respons desain tanah tipe SC (keras) karena memiliki S_{ds} yang paling tinggi.



Gambar 11. Model dan skema strut SAP2000: (a) tipe A, (b) tipe B, (c) tipe C, (d) tipe D

Tabel 3. Ringkasan Hasil Pushover pada Performance Point

Tipe Rumah	Arah	PP (V, D)	PP (S_a, S_d)	PP (T, μ)	PP (B_{eff}, M)
A	PAX	(79.110,549 ; 9,317)	(1,161 ; 11,873)	(0,203 ; 1,000)	(0,050 ; 1,000)
A	PAY	(543.252,6 ; 52,754)	(1,189 ; 29,851)	(0,318 ; 2,348)	(0,112 ; 1,400)
B	PAX	(515.459,2 ; 21,249)	(1,343 ; 47,982)	(0,379 ; 3,169)	(0,165 ; 1,906)
B	PAY	(251.097,25 ; 25,09)	(1,147 ; 21,989)	(0,266 ; 1,716)	(0,077 ; 1,253)
C	PAX	(299.853,12 ; 28,30)	(1,208 ; 23,282)	(0,272 ; 2,021)	(0,105 ; 1,425)
C	PAY	(610.194,3 ; 30,498)	(1,021 ; 33,757)	(0,363 ; 2,372)	(0,114 ; 1,243)
D	PAX	(581.419,8 ; 61,462)	(1,368 ; 42,685)	(0,354 ; 3,823)	(0,186 ; 2,061)
D	PAY	(977.381,2 ; 99,053)	(3,085 ; 69,472)	(0,291 ; 23,69)	(0,173 ; 4,971)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Performance Point dari Output SAP2000

Penentuan kondisi kinerja struktur pada penelitian ini dilakukan melalui *performance point* (PP) yang diperoleh langsung dari *output* SAP2000 menggunakan metode FEMA 440 *Equivalent Linearization*. PP merepresentasikan kondisi struktur ketika kapasitas struktur yang diperoleh dari *pushover* telah memenuhi tuntutan gempa rencana di lokasi penelitian. Parameter PP yang dicatat meliputi *base shear* dan *displacement* pada PP (V, D), serta parameter spektral (S_a, S_d) dan parameter perilaku struktur seperti periode efektif (T_{sec}), daktilitas (μ), redaman efektif (B_{eff}), dan faktor modifikasi (M).

Hasil PP menunjukkan adanya perbedaan respons yang signifikan antara arah pembebanan X (PAX) dan Y (PAY) untuk tiap tipe bangunan. Tipe A, misalnya, menunjukkan deformasi PP yang sangat kecil pada arah X, namun meningkat tajam pada arah Y. Sementara itu, tipe D menghasilkan daktilitas tertinggi pada arah Y ($\mu \approx 23,69$), yang mengindikasikan struktur mampu mengalami deformasi inelastik lebih besar sebelum mencapai titik kinerja.

Evaluasi Kondisi Sendi Plastis pada Step Performance Point

Evaluasi kondisi sendi plastis pada Step Performance Point. Evaluasi tingkat kerusakan elemen dilakukan dengan memeriksa distribusi sendi plastis pada step displacement yang sesuai dengan PP. Kategori sendi plastis dikelompokkan berdasarkan FEMA 356 menjadi Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), dan Collapse Prevention (CP). Hasil rekap sendi plastis menunjukkan bahwa pada umumnya kerusakan lebih dominan terjadi pada elemen balok, sedangkan sebagian besar kolom masih berada pada level B-IO.

Tabel 4. Rekap Kondisi Sendi Plastis pada Performance Point

Tipe	Arah	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D
A	PAX	189	1	0	0	0	0
A	PAY	137	32	14	3	4	0
B	PAX	185	47	9	0	0	1
B	PAY	176	43	12	2	5	4
C	PAX	169	29	0	0	0	0
C	PAY	127	71	0	0	0	0
D	PAX	194	52	0	0	4	0
D	PAY	165	83	0	0	2	0

Prediksi Kerusakan dan Kerugian dengan Metode Hazus

Prediksi kerusakan dan kerugian dilakukan menggunakan metode Hazus melalui pendekatan fungsi kerentanan yang memetakan respons struktur pada kondisi PP menjadi probabilitas tingkat kerusakan (damage state) dan loss ratio. Pada penerapan Hazus original, hasil analisis menunjukkan seluruh tipe bangunan menghasilkan loss ratio yang sama, yaitu 5,03%, karena menggunakan kurva kapasitas default sesuai klasifikasi Hazus tanpa mempertimbangkan karakteristik aktual dari hasil pushover.

Tabel 5. Kerugian Hazus Original

Tipe	Harga Jual [Rp]	Loss Ratio [%]	Kerugian [Rp/unit]
A	2.048.294.100	5,03	Rp103.045.568,-
B	2.523.906.900	5,03	Rp126.972.693,-
C	3.084.200.490	5,03	Rp155.159.940,-
D	3.617.139.240	5,03	Rp181.971.020,-

Selanjutnya dilakukan Hazus Modifikasi dengan menyesuaikan parameter kapasitas berdasarkan hasil pushover sehingga lebih merepresentasikan perilaku aktual struktur

pada lokasi studi. Hasil Hazus modifikasi menghasilkan loss ratio yang lebih besar dan bervariasi antartipe bangunan. Tipe A menghasilkan loss ratio sebesar 21,30%, tipe B 22,49%, tipe C 21,90%, dan tipe D 21,48%. Kerugian terbesar secara nominal terjadi pada tipe C karena nilai total biaya bangunannya paling besar.

Tabel 6. Kerugian Hazus Modifikasi

Tipe	Harga Jual [Rp]	Loss Ratio [%]	Kerugian [Rp/unit]
A	2.048.294.100	15,99	Rp327.421.561,-
B	2.523.906.900	19,64	Rp495.589.913,-
C	3.084.200.490	19,91	Rp613.923.651,-
D	3.617.139.240	22,01	Rp796.196.746,-

Perbedaan hasil antara Hazus original dan Hazus modifikasi menunjukkan bahwa penggunaan parameter default Hazus berpotensi menghasilkan estimasi kerugian yang terlalu rendah untuk bangunan eksisting di wilayah risiko kegempaan tinggi. Oleh karena itu, modifikasi berbasis hasil pushover dapat memberikan prediksi kerugian yang lebih konservatif dan realistis untuk kebutuhan mitigasi.

Pengaruh Variasi Tipe Bangunan

Perbandingan antartipe bangunan menunjukkan bahwa faktor konfigurasi struktur dan tinggi lantai memengaruhi kekakuan lateral dan besarnya deformasi PP. Tipe dengan tinggi lantai lebih besar cenderung menunjukkan deformasi titik kinerja yang lebih tinggi, yang berimplikasi pada meningkatnya demand drift serta peluang terbentuknya sendi plastis lebih banyak pada elemen tertentu. Selain itu, dominasi kerusakan balok pada semua tipe menunjukkan struktur masih cenderung mengikuti mekanisme daktal yang lebih baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa evaluasi kinerja seismik bangunan hunian dua lantai melalui analisis pushover FEMA 440 menghasilkan nilai performance point yang berbeda pada tiap tipe dan arah gempa, sehingga arah kritis struktur perlu ditentukan secara spesifik pada masing-masing tipe bangunan.

Evaluasi sendi plastis pada step performance point menunjukkan bahwa semua tipe

bangunan mengalami kerusakan dominan pada elemen balok, sedangkan kolom masih berada pada level B-IO.

Prediksi kerugian menggunakan Hazus original menghasilkan *loss ratio* seragam sebesar 5,03%, sedangkan Hazus modifikasi menghasilkan *loss ratio* jauh lebih besar dan bervariasi pada rentang 15,99%–22,01%. Hasil ini memperlihatkan bahwa pendekatan modifikasi berbasis *pushover* dapat meningkatkan representasi estimasi kerugian untuk bangunan eksisting pada wilayah risiko kegunaan tinggi.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Pusat Studi Gempa Nasional, *Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*. 2024.
- [2] FEMA 356, “Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings,” no. November, 2000.
- [3] BAPPENAS, “Laporan Bappenas,” 2018.
- [4] FEMA 454, “Risk Management Series Designing for Earthquakes A Manual for Architects,” 2006. [Online]. Available: www.fema.gov
- [5] Q. Zhang and M. S. Alam, “Performance-based seismic design of bridges: a global perspective and critical review of past, present and future directions,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 15, Feb. 2019, doi: 10.1080/15732479.2018.1558269.
- [6] FEMA Hazus 4.2.3, “Hazus Earthquake Model Technical Manual Hazus 4.2 SP3,” 2020.
- [7] C. M. Ramirez and E. Miranda, “BUILDING-SPECIFIC LOSS ESTIMATION METHODS & TOOLS FOR SIMPLIFIED PERFORMANCE-BASED By,” no. 171, 2009.
- [8] M. Priestley, G. Calvi, M. Kowalsky, and G. Powell, “Displacement-Based Seismic Design of Structures,” *Earthquake Spectra - EARTHQ SPECTRA*, vol. 24, May 2008, doi: 10.1193/1.2932170.
- [9] D. Vamvatsikos and C. Allin Cornell, “Incremental dynamic analysis,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 31, no. 3, pp. 491–514, 2002, doi: 10.1002/eqe.141.
- [10] F. Mazza, A. Vulcano, and M. Mazza, “Nonlinear Dynamic Response of RC Buildings with Different Base Isolation Systems Subjected to Horizontal and Vertical Components of Near-Fault Ground Motions,” *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 06, no. 1, pp. 373–383, 2012, doi: 10.2174/1874836801206010373.
- [11] FEMA 273, “NEHRP Guidelines and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings,” 1997. doi: 10.1193/1.1586092.
- [12] I. K. Sudarsana, I. B. R. Widiarsa, M. K. A. Negara, and I. P. A. P. Wirawan, “Pengaruh Dinding Bata Bertulang Terhadap Kinerja Struktur Rangka Dengan Dinding Pengisi (Infilled Frame),” *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil dan Teknik Informasi*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2023, doi: 10.38043/telsinas.v6i1.4224.
- [13] R. J. Mainstone, “On the stiffnesses and strengths of infilled frames, Proc., Instn. Civ. Engrs., Supp. (iv), 57-90.” 1971.
- [14] M. Selim Gunay, “A Practical Guide to Nonlinear Static Analysis of Reinforced Concrete Buildings with Masonry Infill Walls,” 2011.
- [15] M. J. B., P. M. J. N., and P. R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, Aug. 1988, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [16] ATC 40, “ATC 40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Redwood City California,” *Seismic safety commisionion*, vol. 1, no. November 1996, p. 334, 1996.
- [17] Badan Standarisasi Indonesia, “SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan Kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain,” *Jakarta*, no. 8, pp. 1–336, 2020.
- [18] S. 2847, “PENETAPAN STANDAR NASIONAL INDONESIA 2847: 2019 PERSYARATAN BETON STRUKTURAL UNTUK BANGUNAN GEDUNG DAN PENJELASAN SEBAGAI REVISI DARI STANDAR NASIONAL INDONESIA 2847: 2013,” no. 8, 2019.
- [19] Badan Standardisasi Nasional, “SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung,” *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*, pp. 1–248, 2019.
- [20] PUSGEN, “Peta Percepatan Puncak Dan Spektrum Respons,” Jakarta, 2017.