

## PENGARUH PERKUATAN KEKAKUAN *JOINT* BALOK-KOLOM BANGUNAN NON-REKAYASA TERHADAP KINERJA SEISMIK DENGAN METODE *IDA*

Muhtarom Yudiantoro<sup>1</sup>, Edy Purwanto<sup>2</sup> dan Stefanus Adi Kristiawan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi SI Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta  
Email: muhtaromyudiantoro@student.uns.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi SI Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta  
Email: edypurwanto68@staff.uns.ac.id

<sup>3</sup>Program Studi SI Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta  
Email: s.a.kristiawan@ft.uns.ac.id

### ABSTRAK

Kabupaten Pacitan berada pada zona tektonik aktif akibat pertemuan tiga lempeng, sehingga rumah tinggal non-rekayasa di wilayah tersebut memiliki kerentanan tinggi terhadap gempa. Bangunan jenis ini umumnya didirikan tanpa perhitungan struktur yang memadai, sehingga kekakuan sambungan balok dan kolom serta perilaku dinding pengisi dengan bukaan menjadi faktor yang memengaruhi respons seismik bangunan. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis terpadu yang mengkaji pengaruh kekakuan sambungan dan konfigurasi bukaan dinding pengisi secara simultan pada model rumah non-rekayasa dengan pendekatan analisis dinamik nonlinier. Penelitian ini bertujuan menilai signifikansi kedua parameter tersebut dalam meningkatkan ketahanan gempa bangunan sederhana. Metode *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) menggunakan perangkat lunak SeismoStruct diterapkan untuk memperoleh periode efektif, gaya geser dasar, dan perkembangan kerusakan pada berbagai tingkat intensitas gempa. Hasil menunjukkan bahwa bukaan pada dinding pengisi menyebabkan penurunan kapasitas lateral struktur secara konsisten. Sementara itu, variasi kekakuan sambungan balok dan kolom tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap peningkatan kinerja seismik. Temuan ini menegaskan bahwa penataan elemen dinding pengisi memiliki peranan lebih dominan dibandingkan peningkatan kekakuan sambungan dalam upaya meningkatkan ketahanan gempa rumah non-rekayasa.

Kata kunci: bangunan non-rekayasa, *joint* balok-kolom, *Incremental Dynamic Analysis*, kurva kerapuhan, kekakuan *joint*.

### 1. PENDAHULUAN

Gempa bumi sendiri adalah bencana alam yang sulit untuk diprediksi dan dapat menyebabkan kerugian besar, salah satunya adalah kerusakan infrastruktur, terutama bangunan rumah tinggal. Untuk mengurangi dampak kerusakan tersebut, bangunan rumah tinggal sebaiknya dirancang agar kuat menahan beban gempa. Namun, pada kenyataannya banyak rumah tinggal yang ada di Indonesia tidak dirancang dengan mempertimbangkan ketahanan terhadap gempa. Bangunan seperti ini kemudian dikenal sebagai bangunan non-rekayasa.

Dinding pengisi umumnya digunakan sebagai penyekat ruangan dan dibuat dari pasangan bata, batako, atau beton ringan. Meskipun sering diklasifikasikan sebagai elemen non-struktural, dinding pengisi secara nyata berinteraksi dengan rangka bangunan ketika menerima beban gempa. Keberadaan bukaan seperti pintu dan jendela terbukti menurunkan kekakuan dinding, sehingga mengurangi kontribusinya dalam menahan gaya lateral, sebagaimana dilaporkan oleh Giri et al. (2016). Temuan lebih lanjut dari Tekeli et al. (2024) menunjukkan bahwa dinding pengisi dengan bukaan mengalami penurunan kapasitas histeresis dan peningkatan deformasi pada kerangka beton bertulang. Selain itu, tinjauan Zhang (2024) menegaskan bahwa perilaku seismik infill wall sangat sensitif terhadap konfigurasi bukaan.

Kemampuan sebuah bangunan menahan beban gempa sangat dipengaruhi oleh kinerja sambungan balok-kolom, karena elemen ini menyalurkan gaya siklik dari rangka dan menjadi titik konsentrasi kerusakan. Studi eksperimental terbaru oleh Kudiratullah et al. (2024) menunjukkan bahwa sambungan balok-kolom beton bertulang mengalami degradasi kekakuan yang signifikan ketika menerima beban bi-aksial, terutama pada zona sendi plastis, dan peningkatan kekakuan dapat dicapai melalui retrofit haunch. Temuan ini menegaskan bahwa perilaku sambungan di bawah pembebanan ganda lebih kompleks dibanding analisis satu arah. Selain itu, Zheng et al. (2023) melaporkan bahwa detail penulangan spiral pada sambungan pracetak meningkatkan kinerja histeresis dan menunda penurunan kekakuan selama pembebanan berulang. Kekuatan hubungan belok-kolom dapat dilihat pada perilaku kegagalannya.

Keruntuhan *joint* balok-kolom dapat disebabkan oleh dua hal, yaitu kegagalan lentur dan kegagalan geser. Maka kekakuan geser dan lentur dapat dihitung dengan rumus berikut,

$$K_M = \frac{4 \times E \times I}{L} \quad (1)$$

dengan  $K_M$  = kekakuan lentur,  $E$  = modulus elastisitas beton,  $I$  = inersia penampang balok dan  $L$  = panjang elemen.

$$K_V = \frac{12 \times E \times I}{L^3} \quad (2)$$

dengan  $K_V$  = kekakuan geser

Incremental Dynamic Analysis (IDA) adalah pendekatan analisis yang beragam untuk menghitung kinerja struktur dalam situasi gempa secara menyeluruh. Metode ini melibatkan penggunaan model struktural pada satu atau lebih rekaman data gempa yang kemudian disesuaikan dengan berbagai tingkat intensitas. Hasilnya adalah satu atau beberapa kurva respons yang disusun dalam hubungannya dengan tingkat intensitas (Vamvatsikos & Allin Comell, 2002).

Dalam perencanaan dan analisis struktur bangunan, batas kinerja menggambarkan sejauh mana bangunan mampu menahan deformasi akibat beban gempa. Berdasarkan pedoman HAZUZ dalam dokumen FEMA-hazuz MH 2.1, terdapat empat tingkat kerusakan, yaitu slight, moderate, extensive, dan complete. Selain berpedoman pada Hazuz, batas kerusakan juga dapat ditentukan dengan nilai drift ratio yang diperoleh dari hasil analisis, sebagaimana dijelaskan oleh Kristiawan dkk (2023).

$$\left. \begin{aligned} DS1 &= dr_e \\ DS2 &= 0,5(dr_e + dr_y) \\ DS3 &= dr_y \\ DS4 &= 0,8 dr_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Dimana:

$dr_e$  = drift ratio elastic,  $dr_y$  = drift ratio yield dan  $dr_r$  = drift ratio rapture

## 2. METODE PENELITIAN

### Data Struktur Bangunan

Data bangunan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bangunan rumah tinggal 1 lantai yang terletak pada Desa Kendal, Kecamatan Punung, Kabupaten Pacitan dengan kelas situs tanah sedang (SD).



Gambar 1 Perspektif struktur bangunan

Data struktur :

- |                                      |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| a. Sistem Struktur                   | = Sistem Rangka Pemikul Momen |
| b. Jumlah Lantai                     | = 1                           |
| c. Elevasi Balok Ring (Tinggi Model) | = 3,70 m                      |
| d. Elevasi Balok Lantai              | = 2,30 m                      |
| e. Ukuran Kolom (b x h)              | = 0,11 x 0,11 m               |
| f. Ukuran Balok Ring (b x h)         | = 0,11 x 0,15 m               |
| g. Ukuran Balok Lantai (b x h)       | = 0,11 x 0,15 m               |
| h. Ukuran Sloof (b x h)              | = 0,11 x 0,20 m               |

Data material

- |                                                    |             |
|----------------------------------------------------|-------------|
| a. Mutu Beton (balok, kolom, join)                 | = 4 Mpa     |
| b. Mutu Tulangan Longitudinal (Balok, Kolom, Join) | = 400 Mpa   |
| c. Mutu Tulangan Transversal (Balok, Kolom, Join)  | = 505,8 Mpa |
| d. Kuat Tekan Bata                                 | = 2 Mpa     |
| e. Kuat Tekan Mortar                               | = 2 Mpa     |

- f. Berat Jenis Beton =24 kN/m<sup>3</sup>  
 g. Berat Jenis Baja =78,5 kN/m<sup>3</sup>  
 h. Berat Jenis Pasangan Baja =17 kN/m<sup>3</sup>

### Data Gempa

Data gempa yang digunakan diperoleh dari data base rekaman gempa yang tersedia pada PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), yang kemudian disesuaikan dengan target spektrum daerah Pacitan. Data gempa dan gambar target spektrum ditunjukkan pada tabel dan gambar berikut.

Tabel 1 Daftar Rekaman Gempa yang Digunakan

No	Event	Stasiun	Tahun	M (SR)	PGA (g)
1	Loma Prieta RSN 731 (1)	APEEL 10 - Skyline	1989	6,93	0,3177
	Loma Prieta RSN 731 (2)	APEEL 10 - Skyline	1989	6,93	0,0890
2	Loma Prieta RSN 732 (1)	APEEL 10 - Skyline	1989	6,93	0,3688
	Loma Prieta RSN 732 (2)	APEEL 10 - Skyline	1989	6,93	0,2203
3	Loma Prieta RSN 733 (1)	APEEL 10 - Skyline	1989	6,93	0,4078
	Loma Prieta RSN 733 (2)	APEEL 10 - Skyline	1989	6,93	0,1391
4	Imperial Valley RSN 170 (1)	El Centro Array #9	1938	5	0,1943
	Imperial Valley RSN 170 (2)	El Centro Array #9	1938	5	0,2354
5	Imperial Valley RSN 172 (1)	El Centro Array #9	1938	5	0,1713
	Imperial Valley RSN 172 (2)	El Centro Array #9	1938	5	0,1363
6	Northridge RSN 5 (1)	Alhambra-Fremont School	1994	6,69	0,2850
	Northridge RSN 5 (2)	Alhambra-Fremont School	1994	6,69	0,0896
7	Northridge RSN 7 (1)	Alhambra-Fremont School	1994	6,69	0,2677
	Northridge RSN 7 (2)	Alhambra-Fremont School	1994	6,69	0,0404

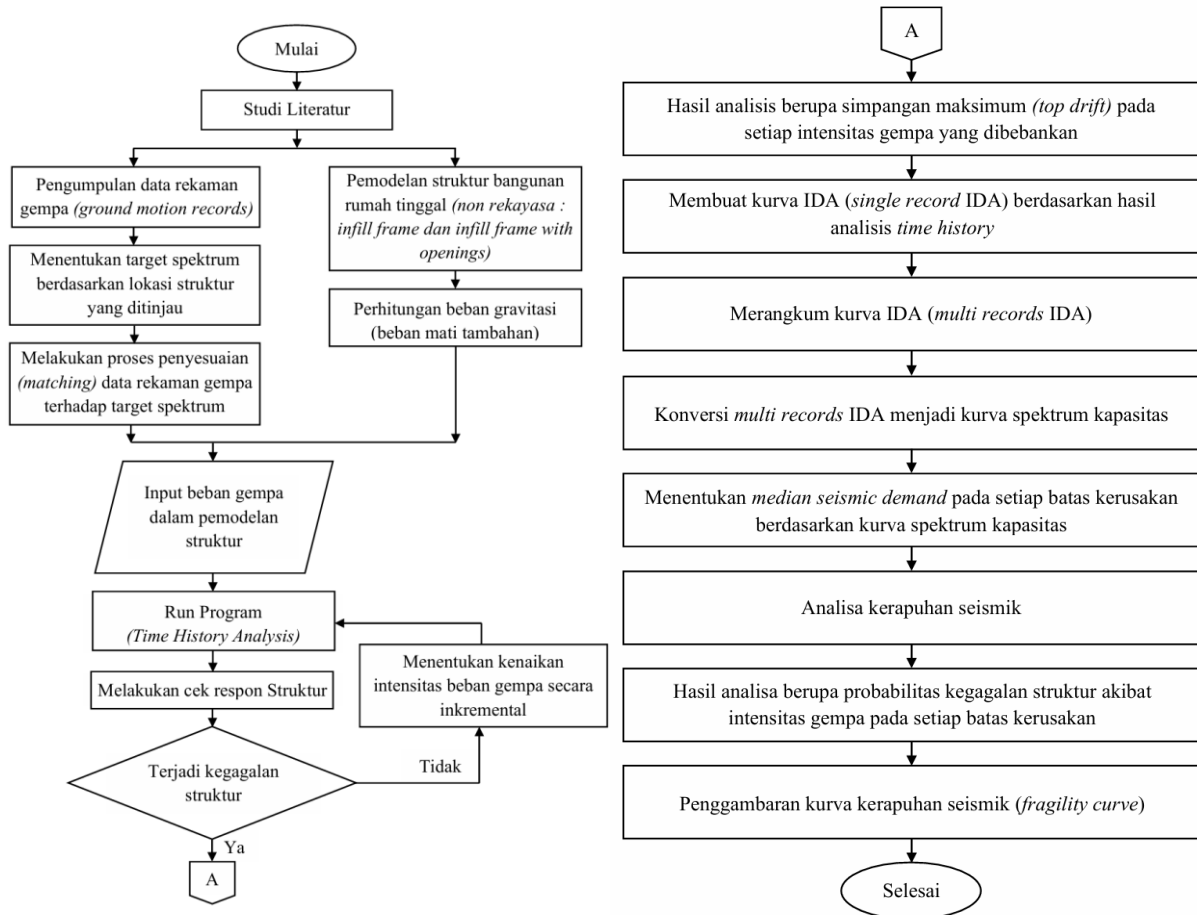
### Permodelan Struktur

Terdapat delapan model struktur yang dianalisis menggunakan software seismostruct:

1. *Infill frame* kekakuan *joint* 100%
2. *Infill frame* kekakuan *joint* 120%
3. *Infill frame* kekakuan *joint* 140%
4. *Infill frame* kekakuan *joint* 160%
5. *Infill frame with opening* kekakuan *joint* 100%
6. *Infill frame with opening* kekakuan *joint* 120%
7. *Infill frame with opening* kekakuan *joint* 140%
8. *Infill frame with opening* kekakuan *joint* 160%

### Pembebanan Statik pada Element Balok

Pada permodelan rumah tinggal sederhana dengan aplikasi Seismostruct, beban atap diasumsikan sebagai beban mati tambahan pada element balok. Maka dari itu, setiap beban mati tambahan harus dihitung sesuai pada setiap penamaan element balok.



Gambar 2 Diagram Alir

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Perhitungan kekakuan Joint

Pada penelitian ini akan mengidentifikasi pengaruh kekakuan *joint* balok kolom, maka dalam permodelan strukturnya akan dimodelkan dengan variasi kekakuan 100%, 120%, 140%, dan 160% dengan nilai kekakuan 100% merupakan kondisi asli di lapangan. Rekapitulasi perhitungan ditunjukkan pada tabel berikut

Tabel 2 Rekapitulasi Perhitungan Kekakuan Joint

Variasi	Kekakuan Geser (kN/m)			Kekakuan Lentur (kN.m)		
	K1	K2	K3	K11	K22	K33
100	3489,75	3489,75	1376,25	1163,25	1163,25	458,75
120	4187,70	4187,70	1651,50	1395,90	1395,90	550,50
140	4885,65	4885,65	1926,75	1628,55	1628,55	642,25
160	5583,60	5583,60	2202,01	1861,20	1861,20	734,00

#### Perhitungan Presentase Bukaannya

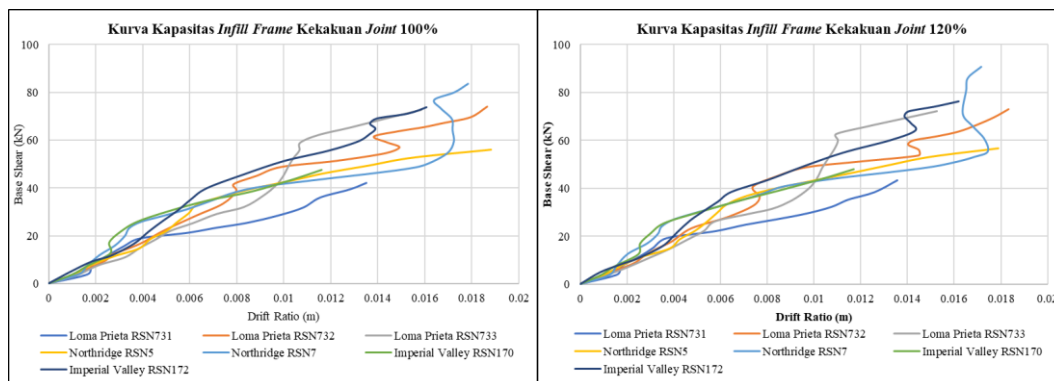
Penelitian ini mengidentifikasi pengaruh bukaan terhadap beban seismik, oleh karena itu diperlukan perhitungan presentase bukaan pada masing-masing dinding pengisi bangunan. Presentase bukaan ditunjukkan pada tabel berikut

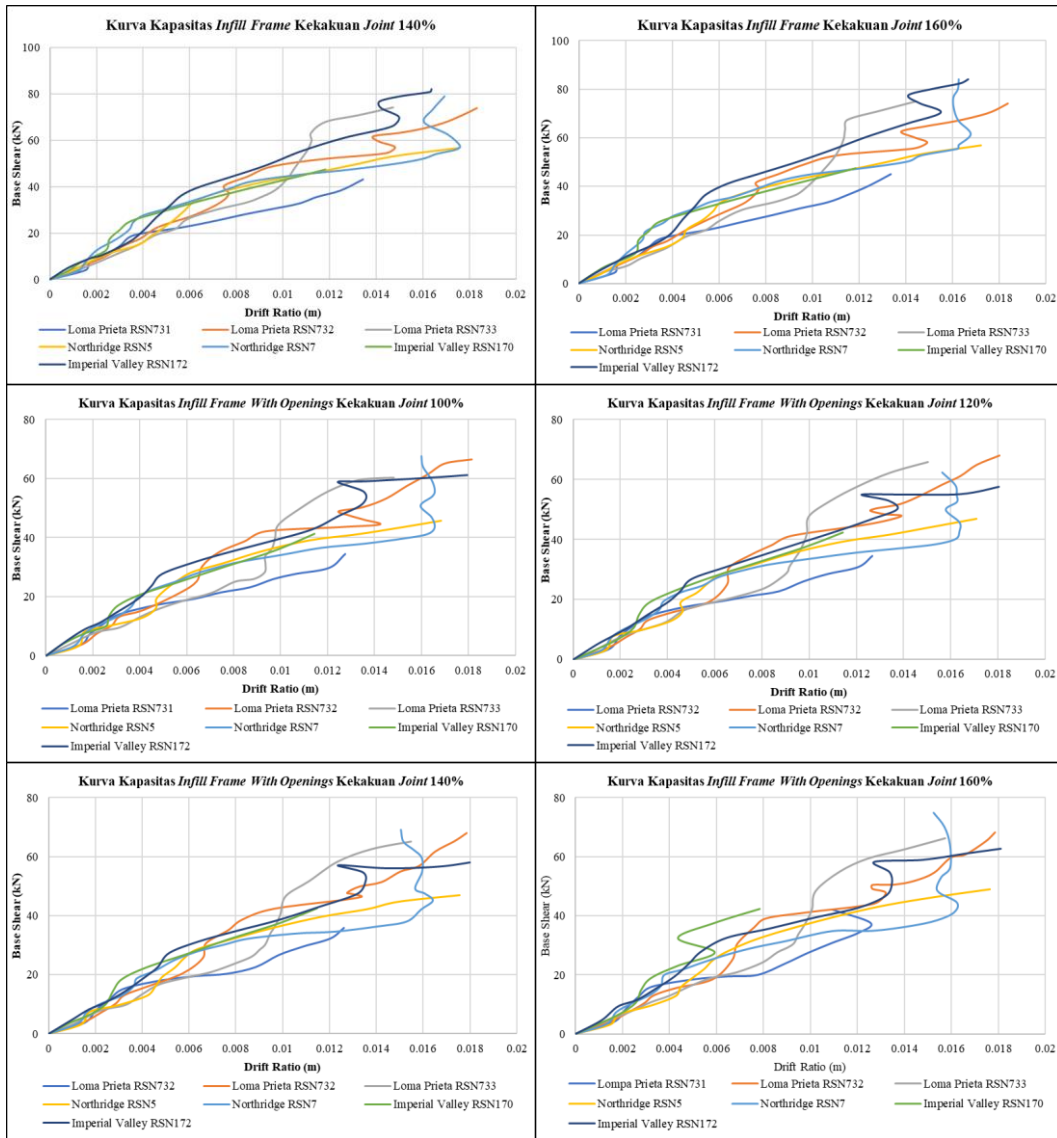
Tabel 3 Perhitungan Presentase Bukaannya pada Dinding

No Dinding	Tinggi Dinding (m)	Lebar Dinding (m)	Luas Dinding (m <sup>2</sup> )	Tinggi Bukaannya (m)	Lebar Bukaannya (m)	Luas Bukaannya (m <sup>2</sup> )	Persentase Bukaannya (%)	Keterangan
1	2,3	4	9,20	1,7	0,55	0,935	10,16	Hanya J1
2	2,3	1,5	3,45					
3	2,3	1,5	3,45	1,7	0,55	0,935	27,10	Hanya J1
4	2,3	3,8	8,74					
5	2,3	2,8	6,44					
6	2,3	2,7	6,21	1,7	0,55	0,935	15,06	Hanya J1
7	2,3	2,3	5,29	1,7	0,55	0,935	17,67	Hanya J1
8	2,3	3,5	8,05					
9	2,3	2,8	6,44					
10	2,3	1,2	2,76	2,1	0,9	1,89	68,48	Hanya P1
11	2,3	1,5	3,45					
12	2,3	1,5	3,45	2,1	0,9	1,89	54,78	Hanya P1
13	2,3	3	6,90					
14	2,3	0,5	1,15					
15	2,3	2,8	6,44	2,1	0,9	1,89	29,35	Hanya P1
16	2,3	3	6,90					
17	2,3	1	2,30	2,1	0,88	1,848	80,35	Hanya P2
18	2,3	2	4,60					
19	2,3	2	4,60					
20	2,3	3	6,90					
21	2,3	3	6,90					
22	2,3	3	6,90	2,1	0,9	1,89	27,39	Hanya P1
23	2,3	3	6,90	2,1	1,8	3,76	54,49	1 P1 dan 2 J1
24	2,3	3	6,90	1,25	1,4	1,75	25,36	Hanya J2

**Incremental Dynamic Analysis**

Incremental Dynamic Analysis (IDA) merupakan pengembangan dari metode time history, di mana analisis dilakukan secara berulang dengan tingkat intensitas gempa yang terus ditingkatkan secara bertahap. Kenaikan intensitas gempa dicapai dengan mengalikan data percepatan tanah (accelerogram) dengan faktor skala tertentu. Kurva IDA yang dihasilkan dari tiap kombinasi memberikan gambaran menyeluruh mengenai perilaku struktur dan menjadi dasar dalam membandingkan kapasitas seismik antar model yang dianalisis. Hasil analisis IDA menghasilkan kurva IDA yang menunjukkan respon struktur yang diakibatkan beban gempa. Berikut grafik kurva IDA ditunjukkan pada gambar dibawah.

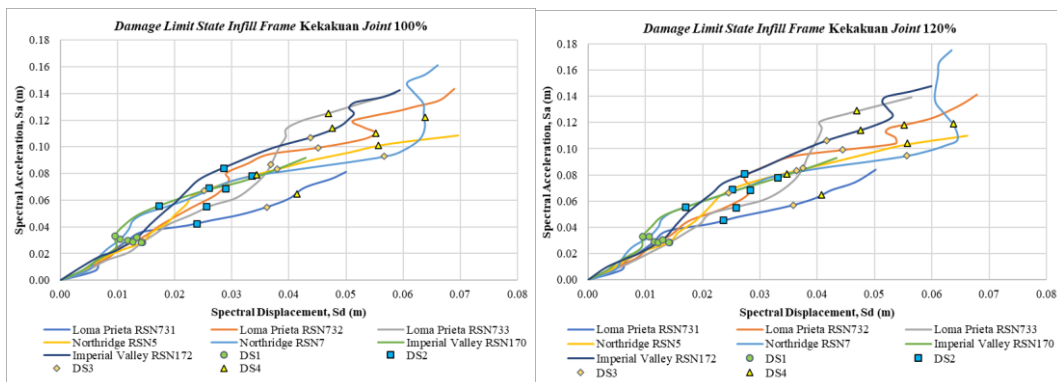


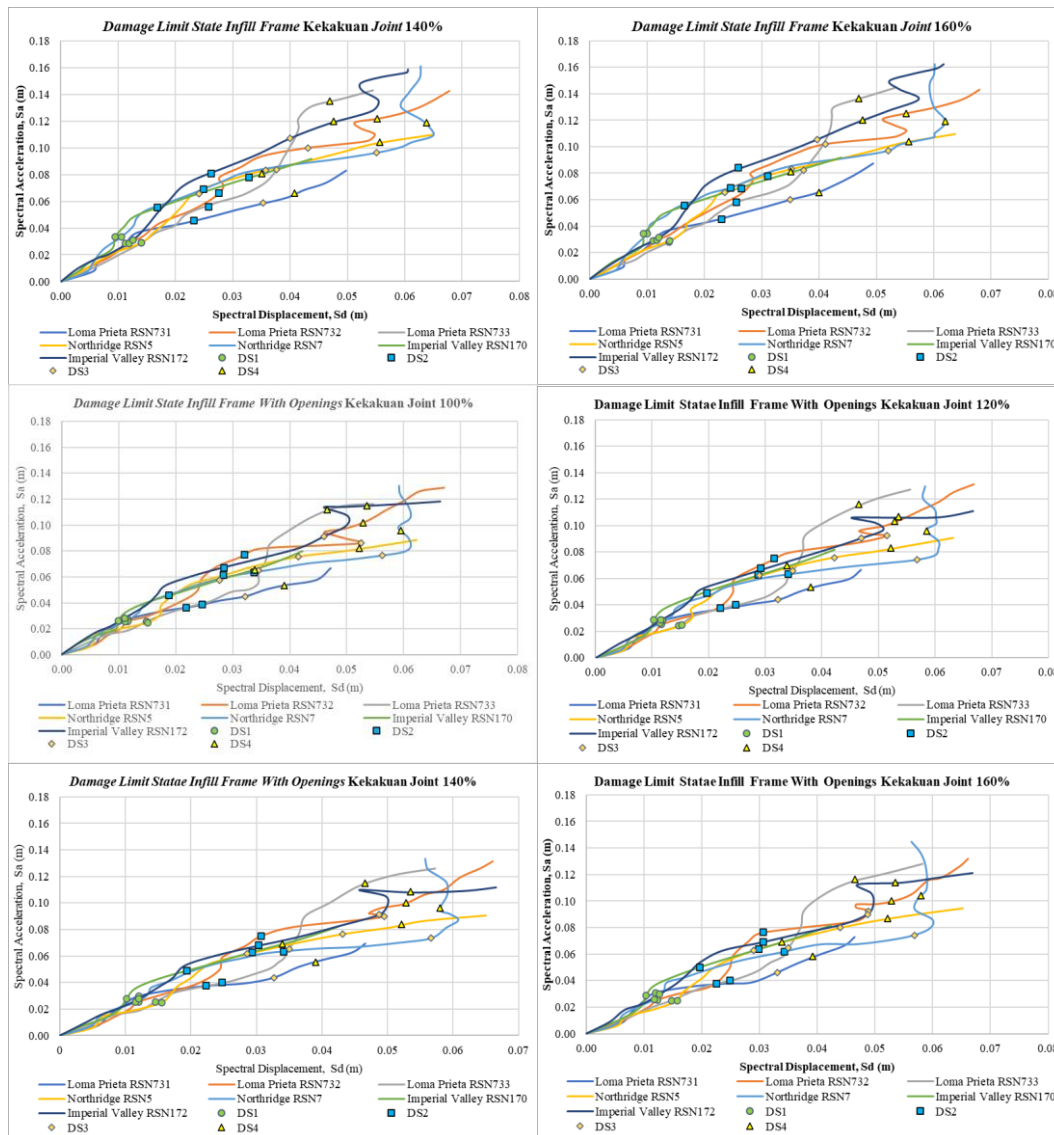


Gambar 3 Grafik Kurva Kapasitas

### Batas Kerusakan Struktur/Damage State

Kriteria kerusakan (*Damage state*) yang sesuai dengan kriteria Hazus diterapkan dalam analisis, namun nilai dari batas kerusakan (*limit state*) merujuk pada hasil penelitian oleh Kristiawan (2023). Besaran nilai *drift ratio* untuk setiap batas kerusakan dapat dilihat pada Persamaan 2.6. Sedangkan *performance criteria* yang dijadikan input pada software meliputi retak pada selimut beton (*crush unconfined*), leleh pada tulangan beton (*yield*), rusak pada inti beton (*crush confined*), chord rotation, kegagalan geser (*shear*), dan *fractured*. Berdasarkan perhitungan dan analisis yang dilakukan, serta visualisasi pada seismostruct maka dapat ditentukan kerusakan pada setiap model bangunan yang dapat dilihat pada gambar berikut:

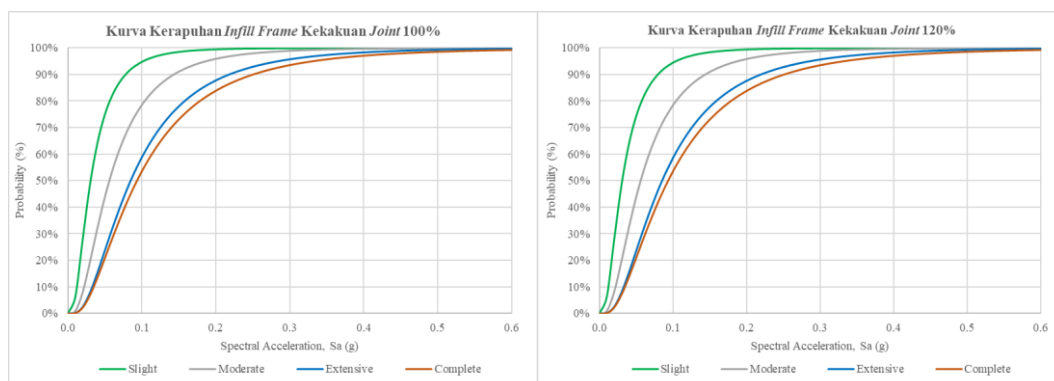


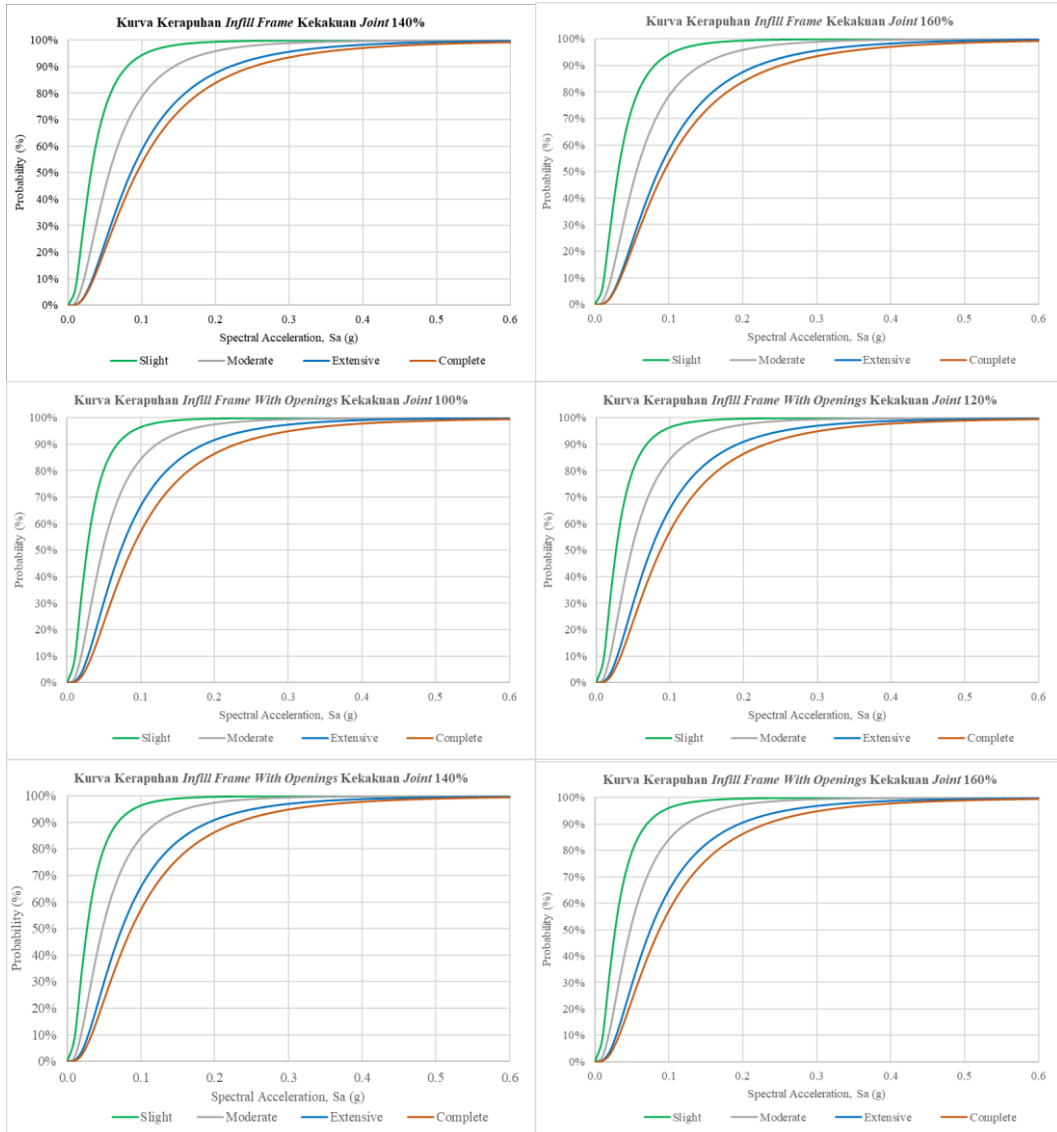


Gambar 4 Kurva *Damage Limit State*

### Analisa Kerapuhan Seismik

Analisis kerapuhan atau fragility harus dihitung untuk menentukan probabilitas kerusakan struktur terhadap percepatan spektral tertentu. Analisis ini perlu dilakukan karena untuk menggambarkan kemungkinan keadaan suatu bangunan jika terjadi gempa bumi. Probabilitas dihitung berdasarkan percepatan spektral mulai dari 0.0 g hingga 0,6 g dengan rentang nilai tertentu sehingga mendapatkan detail perhitungan yang baik untuk menyusun kurva kerapuhan seismik. Berikut merupakan kurva kerapuhan seismik berdasarkan kriteria kerusakan menurut Hazus pada setiap model bangunan yang diteliti.





Gambar 5 Kurva Kerapuhan Seismik

Model bangunan yang telah dianalisis kemudian dilakukan evaluasi untuk mengetahui kemungkinan kerusakan yang terjadi terhadap intensitas gempa tertentu. Penentuan evaluasi ini mengacu pada spektrum daerah Pacitan dengan dua tingkatan gempa yaitu DBE (gempa dengan periode 500 tahun) dan MCE (gempa dengan periode 2500 tahun). Nilai percepatan spektral DBE dan MCE diperoleh dari website [rsa.ciptakarya.pu.go.id](http://rsa.ciptakarya.pu.go.id) dimana nilai MCE sebesar 0,5290 g dan nilai DBE sebesar 2/3 dari nilai MCE yaitu 0,3527 g. Parameter yang digunakan untuk melihat apakah terjadi perbedaan atau peningkatan kapasitas bangunan dalam menahan beban seismik yaitu dengan melihat kurva kerapuhan pada masing-masing variasi pada setiap model bangunan. Untuk dapat melihat perbedaannya maka akan dicoba dengan melihat tingkat kerusakan bangunan pada percepatan spektral tertentu, dalam hal ini peneliti mencoba pada nilai 25% dari DBE pada model bangunan non rekayasa infill frame dan infill frame with openings.

Tabel 4 Discrete Damage Perbandingan Model Struktur Infill Frame

Limit State	Infill Frame 100%		Infill Frame 120%		Infill Frame 140%		Infill Frame 160%	
	P	DD	P	DD	P	DD	P	DD
UnDamaged	7,32%		7,71%		7,85%		8,00%	
Slight	92,68%	19,52%	92,29%	19,19%	92,15%	19,21%	92,00%	19,26%
Moderate	73,15%	21,13%	73,10%	21,34%	72,94%	21,29%	72,74%	21,18%
Extensive	52,02%	4,99%	51,76%	5,72%	51,65%	5,77%	51,56%	6,34%
Complate	47,03%	47,03%	46,05%	46,05%	45,88%	45,88%	45,22%	45,22%
Jumlah		92,68%		92,29%		92,15%		92,00%

Tabel 5 Discrete Damage Perbandingan Model Struktur *Infill Frame With Openings*

Limit State	Infill Frame With Openings 100%		Infill Frame With Openings 120%		Infill Frame With Openings 140%		Infill Frame With Openings 160%	
	P	DD	P	DD	P	DD	P	DD
	<i>UnDamaged</i>	4,44%		4,61%		5,03%		5,09%
<i>Slight</i>	95,56%	14,34%	95,39%	14,81%	94,97%	15,07%	94,91%	15,24%
<i>Moderate</i>	81,22%	15,43%	80,58%	15,62%	79,89%	15,49%	79,66%	15,71%
<i>Extensive</i>	65,79%	12,02%	64,97%	12,10%	64,40%	12,07%	63,96%	13,39%
<i>Complate</i>	53,76%	53,76%	52,87%	52,87%	52,33%	52,33%	50,56%	50,56%
Jumlah		95,56%		95,39%		94,97%		94,91%

Keterangan P = Probability dan DD = Discrete Damage

Berdasarkan hasil pada kondisi 25% DBE, peningkatan kekakuan joint menunjukkan pengaruh yang konsisten dalam menurunkan probabilitas kerusakan, meskipun besarnya penurunan relatif kecil. Pada model *infill frame*, probabilitas kerusakan *slight* menurun dari 92,68%, 92,29%, 92,15%, hingga 92,00% untuk kekakuan joint 100–160%. Pada model *infill frame with openings*, kecenderungan serupa terlihat dengan penurunan dari 95,56% menjadi 94,91% pada rentang kekakuan yang sama. Temuan ini sejalan dengan kajian Xie et al. (2023), yang menyatakan bahwa peningkatan kekakuan joint hanya meningkatkan kapasitas lateral sebesar 4–8%, sehingga kontribusinya terhadap peningkatan kinerja seismik bangunan relatif moderat. Hal tersebut diperkuat oleh Tanganelli et al. (2024), yang melaporkan bahwa pada struktur rendah seperti rumah sederhana, variasi kekakuan joint umumnya tidak menjadi faktor dominan dalam memengaruhi respons seismik global. Dengan demikian, kontribusi kekakuan joint terhadap pengurangan kerusakan dapat dinilai bersifat terbatas dan cenderung berskala kecil.

Meskipun demikian, ketika dibandingkan dengan variasi kekakuan joint, pengaruh keberadaan bukaan pada dinding pengisi memberikan dampak yang jauh lebih signifikan terhadap kapasitas seismik. Pada kekakuan joint 100%, probabilitas kerusakan *slight* untuk *infill frame* adalah 92,68%, sedangkan pada *infill frame with openings* mencapai 95,56%, sehingga perbedaannya sekitar 3%. Besarnya gap respons ini sejalan dengan temuan Al-Chaar et al. (2023), yang melaporkan bahwa bukaan dapat menurunkan kekakuan *in-plane* dinding pengisi hingga 25–45%, sehingga mengurangi kemampuan elemen tersebut dalam menahan gaya lateral. Selain itu, De Risi et al. (2024) menunjukkan bahwa konfigurasi bukaan yang tidak teratur dapat meningkatkan simpangan antar-lantai sebesar 20–35%, sehingga menjadikan bukaan sebagai faktor yang lebih dominan dalam menurunkan kinerja seismik dibandingkan perubahan kekakuan joint. Oleh karena itu, secara akademik dapat disimpulkan bahwa kehadiran bukaan merupakan determinan utama dalam menurunkan kapasitas seismik struktur rumah non-rekayasa.

#### 4. KESIMPULAN

Rangkaian teori, pengumpulan data, pengolahan data, proses analisis, dan pembahasan mengenai evaluasi kinerja struktur rumah tinggal non rekayasa: struktur *Infill Frame* dan *Infill Frame* dengan variasi kekakuan *joint* balok kolom 100%,120%,140%, dan 160% menghasilkan beberapa kesimpulan yang menjawab rumusan masalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil analisis struktur *infill frame* menunjukkan kapasitas *base shear* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur *infill frame with openings* pada semua variasi kekakuan *joint* yang diteliti. Pada variasi kekakuan *joint* 100%, kapasitas base shear rata-rata *infill frame* mencapai 64,2658 kN, sedangkan *infill frame with openings* hanya 51,0321 kN. Sedangkan untuk variasi kekakuan *joint* 160% nilai base shear untuk struktur *infill frame* mencapai 66,4265 kN dan *infill frame with openings* hanya 53,2301 kN. Selisih ini menunjukkan bahwa keberadaan bukaan pada dinding infill dapat menurunkan kekuatan struktur dalam menahan beban seismik.
2. Variasi kekakuan *joint* balok-kolom sebesar 100%, 120%, 140%, hingga 160% menunjukkan pengaruh yang relatif kecil terhadap kapasitas seismik struktur bangunan rumah tinggal non-rekayasa. Pada struktur *infill frame*, peningkatan kekakuan *joint* meningkatkan respons struktur terhadap gempa, meskipun peningkatannya tidak terlalu besar. Pada struktur *infill frame with openings*, peningkatan kekakuan *joint* balok-kolom dapat meningkatkan kapasitas seismik. Secara umum, peningkatan kekakuan *joint* memberikan perbaikan performa struktural, namun perubahan kapasitas seismik tidak terlalu besar. Struktur *infill frame* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan struktur *infill frame with openings*, pada semua tingkat kekakuan yang dianalisis.
3. Dari hasil kurva kerapuhan IDA yang telah dihasilkan, dapat dinyatakan kerusakan yang terjadi pada model bangunan yang dianalisis. Dari hasilnya, model bangunan *Infill Frame* memiliki kemungkinan kerusakan yang lebih kecil daripada bangunan *Infill Frame with openings*. Dari bangunan *Infill Frame* dengan kekakuan 160% memiliki kemungkinan kerusakan yang paling rendah dibandingkan dengan model lainnya, sebagai contoh dengan  $S_a=25\%$  DBE ; 0,0882 g pada tingkat kerusakan DS4 atau complete bangunan *Infill Frame* kekakuan 160% memiliki probabilitas 45,22% dibandingkan bangunan *Infill Frame* kekakuan 100%, 120%, dan 140% yang masing masing memiliki probabilitas kerusakan sebesar 47,03%, 46,05%, dan 45,88%. Sedangkan model bangunan

*Infill Frame* with Openings dengan kekakuan 100%, 120%, 140%, dan 160% berturut-turut memiliki probabilitas kerusakan sebesar 53,76%, 52,87%, 52,33%, dan 50,56%. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan kekakuan *joint*, maka kapasitas seismik bangunan juga meningkat, hal tersebut dapat dilihat dengan menurunnya probabilitas kerusakan yang terjadi.

4. Keberadaan bukaan pada dinding pengisi terbukti menurunkan kekakuan lateral dan kapasitas base shear struktur, sehingga meningkatkan probabilitas kerusakan pada kondisi gempa, sebagaimana terlihat pada model *infill frame with openings* yang konsisten menunjukkan performa lebih rendah dibandingkan *infill frame* utuh pada seluruh variasi kekakuan *joint*. Oleh karena itu, kebijakan mitigasi yang relevan perlu berfokus pada pengendalian konfigurasi dan dimensi bukaan melalui penetapan rasio maksimum luas bukaan terhadap panel dinding, serta pembatasan pembuatan bukaan tambahan pada bangunan eksisting tanpa evaluasi teknis. Selain itu, diperlukan program retrofitting sederhana bagi rumah non-rekayasa yang memiliki bukaan signifikan, misalnya melalui pemasangan panel dinding penguat, bracing baja ringan, atau material mortar penguat untuk memulihkan kekakuan panel. Pemerintah daerah juga perlu memasukkan pengaturan bukaan dinding pengisi ke dalam pedoman bangunan sederhana tahan gempa serta menyediakan edukasi teknis kepada tukang dan masyarakat mengenai konfigurasi bukaan yang aman agar risiko kegagalan struktural akibat berkurangnya kontribusi dinding pengisi dapat diminimalkan.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Chaar, G., Abu-Hassan, M., & Issa, M. (2023). "In-plane response reduction of infill walls with openings under seismic loading". *Engineering Structures*, 281, 115–128.
- Araby, M. Z., Rizal, S., Afifuddin, M., & Abdullah A. (2021). "Analisis Perlakuan *Joint* Balok Kolom Terhadap Beban Siklik dengan Penambahan Senggang pada *Joint* Sesuai SK SNI T-15-1991-03". *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, 4(2), 49-59.
- Boen, T. (2001). "Earthquake resistant design of non-engineered buildings in Indonesia". In *EQTAP Conference*, 1-34
- De Risi, M. T., Furtado, A., & Verderame, G. M. (2024). "Seismic performance sensitivity of RC frames with irregular infill opening configurations". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, 108–122.
- FEMA. HAZUS-MH MR5. (2010). "Advanced Engineering Building Module (AEBM)". Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2012). "Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, Hazus–MH 2.1: Technical Manual". In *Federal Emergency Management Agency*.
- Giri, I. B. D., Putra, D., & Pratama, G. P. S. E. (2016). "Perilaku Struktur Rangka Dinding Pengisi dengan Bukaan pada Gedung Empat Lantai". Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran – Bali. 72-79.
- Hadibroto, B., & Ronitua, S. (2018). "Perbaikan Dan Perkuatan Bangunan Sederhana Akibat Gempa". *Educational Building: Jurnal Pendidikan Teknik Bangunan dan Sipil*, 4(1), 46-55.
- Kristiawan, S. A., Safarizki, H. A., Purwanto, E., Sangadji, S., Trisnawan, A. D., dan Nugroho, T. S. N. (2023). "Penentuan Batasan Tingkat Kerusakan Seismik Pada Bangunan Non-Engineered Di Pacitan". *Konf. Nas. Tek. Sipil*, 1(3), 16–17.
- Kudiratullah, A. A., Shafie, M. H., Yousuf, M., Salawudeen, T., Yahaya, A. S., & Junaid, M. T. (2024). "Experimental evaluation of reinforced concrete beam–column joints subjected to bi-axial cyclic loading and enhanced using haunch retrofit". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 3125–3167.
- Putra, A. D. T., (2024). "Evaluasi Kinerja Struktur Rumah Tinggal Non Rekayasa Dan Rekayasa : Struktur Open Frame Dan Infill Frame Berbasis Ida".
- Rahman, F., Idris, Y., Abdullah, Asyifa, C. N. (2022), "Pengembangan Kurva Kerapuhan Berbasis *Incremental Dynamic Analysis* pada Bangunan Tipikal Puskesmas di Kota Banda Aceh terhadap Bahaya Gempa", 4(3), 246-252.
- SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung
- SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung
- SNI 15-2094-2000 Bata Merah Pejal untuk Pasangan Dinding
- SNI 6882:2014 Spesifikasi Mortar Untuk Pekerjaan Unit Pasangan
- Tanganelli, M., Puppio, M. L., & Viti, S. (2024). "Stiffness modification effects on RC low-rise structures under seismic demand". *Structures*, 59, 2041–2055.
- Tekeli, H., Yüksel, C., Anil, Ö., Ilki, A., Anılan, A., & Tünay, M. (2024). *Experimental and numerical investigation of hysteretic earthquake behavior of masonry infilled RC frames with opening strengthened by adding rebar-reinforced stucco. Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 3169–3207.
- Tamara, M. (2011). *Evaluasi Kerusakan Bangunan Akibat Gempa Besar*
- Vamvatsikos, D. & Cornell, C.A. (2002). *Incremental Dynamics Analysis. Earthquake Engineering Structure by John Wiley & Sons, Ltd.*

- Xie, Q., Wang, Z., & Zhou, Y. (2023). "Parametric assessment of beam-column joint stiffness on seismic capacity of RC frames". *Journal of Building Engineering*, 72, 106–115.
- Zhang, H. (2024). "A review of seismic performance of infill wall frame structures under flexible connections". *Advances in Research*, 25(1), 13–20.
- Zheng, J., Pan, Z., Zhen, H., Deng, X., Zheng, C., Qiu, Z., Xie, L., Xiong, Z., Li, L., & Liu, F. (2023). "Experimental investigation on the seismic behavior of precast concrete beam-column joints with five-spiral stirrups". *Buildings*, 13(9), 2357.