

ANALISIS FRAGILITAS STRUKTUR RANGKA KOLOM KUAT-BALOK LEMAH BETON BERTULANG AKIBAT GEMPA

Made Hendra Prayoga¹⁾, Ida Bagus Prastha Bhisama²⁾

^{1,2}Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia
Email: hendra.prayoga@unud.ac.id

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis fragilitas struktur rangka dengan pengembangan kurva fragilitas dan perhitungan peluang kegagalan (P_f) struktur. Digunakan 2 buah model struktur yaitu struktur SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Kusus) dan SRPMB (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa). Untuk mengetahui pengaruh *soft story* terhadap peluang kegagalan struktur akibat gempa, dibuat 4 model struktur dengan *soft story*. Analisis statis *pushover* (NSP) dan dinamis *nonlinear time history* (NLTHA) digunakan untuk mengevaluasi performa seismik struktur. Untuk mencapai taraf kinerja CP (*Collapse Prevention*), struktur perlu diperkuat karena terjadi *column sidesway mechanism* sehingga rasio kuat penampang kolom-balok yang diperlukan lebih besar dari ketentuan dalam peraturan. Kegagalan akibat geser juga dipastikan tidak terjadi pada kolom dan balok. Untuk struktur yang sudah diperkuat, struktur SRPMB memiliki nilai P_f yang lebih kecil dibandingkan struktur SRPMK. Struktur SRPMB dengan perkuatan dapat digunakan pada daerah rawan gempa. Struktur yang sudah diperkuat tidak rentan dengan mekanisme *soft story*. *Soft story* pada lantai dasar lebih berpeluang terjadi dibandingkan *soft story* pada lantai tengah bangunan.

Kata kunci: kurva fragilitas, peluang kegagalan, *soft story*, SRPMB, SRPMK

FRAGILITY ANALYSIS OF STRONG COLUMN-WEAK BEAM RC FRAME DUE TO EARTHQUAKE

ABSTRACT

In this study, the fragility analysis of reinforced concrete (RC) frame structures was carried out by developing the fragility curve and calculating the probability of failure (P_f). Two structural models were used in the analysis, namely special moment frame (SMF) and ordinary moment frame (OMF). To determine the effect of soft story on the probability of failure due to earthquakes, 4 structural models with soft story were created. Nonlinear static pushover (NSP) analysis and dynamic nonlinear time history analysis (NLTHA) were used to evaluate the seismic performance of the structure. To achieve collapse prevention (CP) performance level, the structures need to be strengthened due to the column sidesway mechanism so that the required column-beam nominal strength ratio is greater than the provisions in the codes. Failure due to shear is also ensured not to occur in columns and beams. For structures that have been strengthened, the OMF structure has a smaller P_f value than the SMF structure. OMF structure that has been strengthened, can be used in all seismic regions. Structures that have been strengthened are not vulnerable to the soft story mechanism. The soft story on the ground floor is more likely to occur than the soft story on the middle floor of the building.

Keywords: fragility curve, probability of failure, *soft story*, OMF, SMF

1 PENDAHULUAN

Intensitas terjadinya gempa di wilayah Indonesia cukup tinggi. Beberapa contoh gempa besar yang pernah melanda Indonesia yaitu Gempa Aceh (2004, $M_w = 9.1$), Gempa Jogjakarta (2006, $M_w = 6.3$), Gempa Padang (2007, $M_w = 8.4$), Gempa Lombok (2018, $M_w = 6.9$), Gempa Sulawesi (2018, $M_w = 7.5$) dan Gempa Cianjur (2022, $M_w = 5.6$). Untuk daerah rawan gempa, perlu dilakukan analisis fragilitas struktur akibat gempa. Analisis fragilitas dilakukan dengan pengembangan kurva fragilitas dan perhitungan peluang kegagalan struktur (P_f) akibat gempa. Kurva fragilitas menunjukkan peluang struktur mencapai *collapse* jika dibebani gempa dengan intensitas tertentu.

Sudah banyak penelitian sebelumnya yang membahas tentang pengembangan kurva fragilitas struktur, tetapi tidak menghitung nilai P_f struktur. Astriani dkk (2016) mengembangkan kurva fragilitas untuk struktur rangka dan struktur dengan dinding geser. Struktur dengan dinding geser memiliki performa seismik yang lebih baik. Ibrahim dkk (2016) juga mengembangkan kurva fragilitas untuk struktur rangka dan struktur dengan dinding geser dengan jumlah tingkat yang bervariasi. Nazri dkk (2017) membandingkan kurva fragilitas untuk struktur beraturan dan tidak beraturan. Kegagalan *soft story* sering terjadi pada daerah rawan gempa. *Soft story* terjadi karena adanya perbedaan kekakuan yang besar antar lantai tingkat bangunan, contohnya yaitu pada bangunan dengan distribusi dinding yang tidak merata. Mohammadi (2022) mengembangkan kurva fragilitas untuk struktur dengan *soft story*.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis fragilitas dengan mengembangkan kurva fragilitas dan menghitung nilai P_f struktur. Digunakan 2 model struktur yang didesain dengan ketentuan SRPMK dan SRPMB. Untuk mengetahui pengaruh *soft story* terhadap peluang kegagalan struktur akibat gempa, dibuat 2 model struktur SRPMK dengan *soft story* dan 2 model struktur SRPMB dengan *soft story*. *Soft story* ditinjau terjadi pada lantai dasar dan lantai tengah bangunan. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan pedoman untuk menghitung nilai P_f struktur.

2 FRAGILITAS STRUKTUR

2.1 Mekanisme keruntuhan bangunan

Untuk struktur tahan gempa, harus dipastikan terjadi mekanisme keruntuhan struktur yang aman. Terdapat 2 tipe mekanisme keruntuhan bangunan yaitu *beam sidesway mechanism* dan *column sidesway mechanism*. Pada *beam sidesway mechanism*, plastifikasi terjadi pada balok. Sedangkan pada *column sidesway mechanism*, plastifikasi terjadi pada ujung-ujung kolom. Kondisi ini dapat menimbulkan keruntuhan parsial dan global pada struktur. Untuk struktur tahan gempa, diharapkan terjadi *beam sidesway mechanism* dimana plastifikasi terjadi pada balok dan kolom dasar. Untuk mencapai kondisi tersebut, kolom harus didesain lebih kuat daripada balok (*strong column-weak beam*). Berdasarkan SNI 2847:2019 (2019), harus terpenuhi rasio kapasitas nominal kolom-balok yaitu:

$$\Sigma M_e \geq (6/5)\Sigma M_g \quad (1)$$

dimana: ΣM_e = Jumlah kapasitas nominal kolom pada hubungan balok-kolom

ΣM_g = Jumlah kapasitas nominal balok pada hubungan balok-kolom

2.2 Fragilitas atau kerentanan struktur

Analisis fragilitas struktur sangat penting dilakukan pada daerah rawan gempa. Tingkat fragilitas struktur dapat diketahui dengan pengembangan kurva fragilitas. Kurva fragilitas menunjukkan peluang struktur mencapai *collapse* atau taraf kinerja tertentu jika dibebani gempa dengan intensitas tertentu. Intensitas gempa yang digunakan pada penelitian ini yaitu PGA (*Peak Ground Acceleration*). IAEA (2005), menyatakan bahwa kurva fragilitas dapat diasumsikan berdistribusi lognormal. Persamaan kurva fragilitas yang diusulkan oleh Kennedy dan Ravindra (1984) digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

$$P_{f|A}(a) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{a}{a_m} \right) + \beta_U \Phi^{-1}(Q)}{\beta_R} \right) \quad (2)$$

dimana: Q = Tingkat kepercayaan

β_U = *Epistemic uncertainty*, ketidakpastian dalam penentuan nilai PGA median (a_m)

β_R = *Aleatory variability*, keacakan atau variasi dari nilai PGA median (a_m)

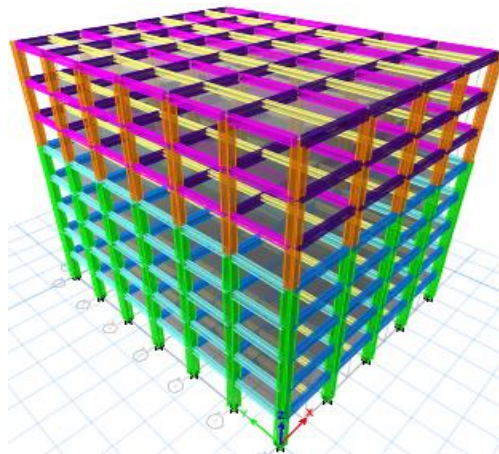
a = Nilai PGA

3 METODE

Penelitian ini dimulai dengan memodel dan mendesain struktur bangunan menggunakan *software* ETABS v.16. Digunakan 2 model struktur yaitu struktur yang didesain berdasarkan ketentuan SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Kusus) dan SRPMB (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa). Struktur didesain berdasarkan ketentuan desain bangunan gedung yang berlaku di Indonesia SNI 2847:2019 (2019). Kemudian dilakukan analisis statis *pushover* (NSP) dan dinamis *nonlinear time history* (NLTHA) untuk menentukan kurva fragilitas dan peluang kegagalan dari setiap struktur. Untuk mengetahui pengaruh *soft story* terhadap peluang kegagalan struktur akibat gempa, dibuat 2 model struktur SRPMK dengan *soft story* dan 2 model struktur SRPMB dengan *soft story*. *Soft story* ditinjau terjadi pada lantai dasar dan lantai tengah bangunan.

3.1 Deskripsi model struktur

Pada penelitian ini digunakan model struktur 8 tingkat yang terdiri dari 4 bentang pada sumbu x dan 6 bentang pada sumbu y dengan panjang tiap bentang 6 m dan 5 m. Tinggi tingkat pada lantai dasar yaitu 4 m sedangkan untuk lantai di atasnya 3.5 m. Bangunan berfungsi sebagai kantor dan diasumsikan berada pada lokasi BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional) Bandung. Kuat tekan beton yang digunakan untuk balok dan kolom yaitu 35 MPa dan 40 MPa. Tegangan leleh tulangan longitudinal dan transversal yaitu 400 MPa. Dimensi balok untuk lantai 1-5 yaitu 35 x 70 (sumbu x) dan 30 x 60 (sumbu y). Sedangkan untuk lantai 6-8, digunakan balok 35 x 60 dan 30 x 50. Dimensi kolom untuk lantai 1-5 yaitu 70 x 70 dan untuk lantai 6-8 yaitu 60 x 60. Model 3D struktur ditampilkan pada Gambar 1.



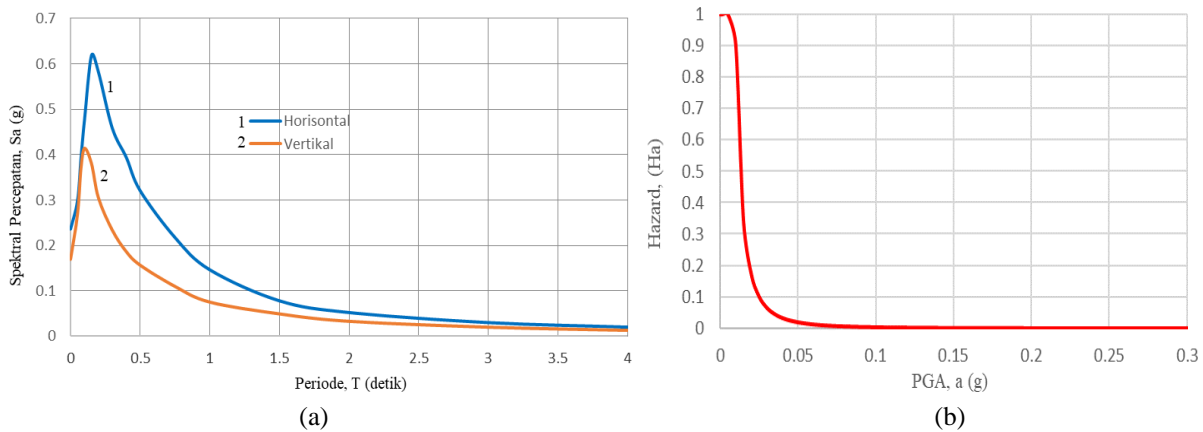
Gambar 1. Model 3D struktur bangunan

Pembebanan struktur mengacu pada SNI 1727:2020 (2020). Berat sendiri struktur dihitung secara otomatis pada *software*. Beban hidup untuk pelat lantai dan atap yaitu 250 kg/m² dan 100 kg/m². Sedangkan beban mati tambahan untuk pelat lantai dan atap yaitu 88 kg/m² dan 57 kg/m². Beban gempa menggunakan analisis respons spektra dengan respons spektra horisontal dan vertikal berdasarkan SHA (*Seismic Hazard Analysis*) pada lokasi bangunan (Mangkoesebroto, 2005). Kombinasi pembebanan mengacu pada SNI 1726:2019 (2019).

3.2 SHA (*Seismic Hazard Analysis*) dan data rekaman gempa

SHA (*Seismic Hazard Analysis*) merupakan analisis yang mengkombinasikan PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) dengan DSHA (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*). Hasil analisis SHA yaitu nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) untuk setiap periode ulang (*return period*) dan nilai PGA maksimum (MCE) untuk daerah tertentu. Parameter-parameter ini digunakan dalam analisis fragilitas struktur. Pada lokasi bangunan, sudah dilakukan analisis SHA yaitu *Seismic Hazard Analysis of the Bandung Nuclear Reactor Site* (Mangkoesebroto, 2005). Nilai PGA maksimum rerata + satu deviasi standar ($\mu + \sigma$) untuk arah horisontal yaitu 0.354 g dan untuk arah vertikal yaitu 0.256 g. Dalam pengembangan kurva fragilitas, digunakan nilai PGA median (m) yaitu 0.236 g untuk arah horisontal dan 0.170 g untuk arah vertikal. Periode ulang (T_R) yang ditinjau dalam PSHA yaitu 100, 200, 300, 500, 1000, 2500, 5000 dan 10000 tahun. Peluang terlampaui tahunan ($H(a)$) untuk setiap nilai PGA dapat ditentukan dari hubungan $H(a) = 1/T_R$. Kurva hubungan antara PGA vs $H(a)$

disebut dengan kurva *hazard* yang digunakan untuk menghitung peluang kegagalan struktur. Target spektra median dan kurva *hazard* ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. a. Target spektra median, b. Kurva *hazard*

Parameter IM (*Intensity Measure*) yang digunakan dalam penelitian ini yaitu nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) dari setiap gempa. Dalam penelitian ini, digunakan delapan buah data rekaman gempa yang didapat dari PEER Database (PEER, 2022). Nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) dari setiap gempa ditampilkan pada Tabel 1. Pada arah mayor, nilai PGA bervariasi dari 0.27 g – 0.69 g. Kemudian dilakukan *spectral matching* untuk setiap data rekaman gempa dengan target spektra horizontal dan vertikal median dari hasil analisis SHA (Mangkoesebroto, 2005). Untuk arah minor, target spektra yang digunakan yaitu target spektra horizontal yang sudah dikalikan dengan rasio antara PGA arah major dengan minor untuk setiap gempa. *Spectral matching* dilakukan dengan bantuan *software* ETABS v.16.

Tabel 1. Nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) untuk setiap gempa

No	Nama Gempa	Arah		
		Mayor	Minor	Vertikal
		PGA	PGA	PGA
		(g)	(g)	(g)
1	El Mayor-Cucapah (2010)	0.54	0.41	0.80
2	Erzican Turkey (1992)	0.50	0.39	0.23
3	Imperial Valley-07 (1979)	0.27	0.16	0.08
4	Imperial Valley-06 (1979)	0.28	0.20	0.19
5	Kobe Japan (1995)	0.33	0.28	0.34
6	Mammoth Lakes-02 (1980)	0.44	0.39	0.26
7	N.Palm Springs (1986)	0.69	0.67	0.38
8	Parkfield (1966)	0.36	0.27	0.14

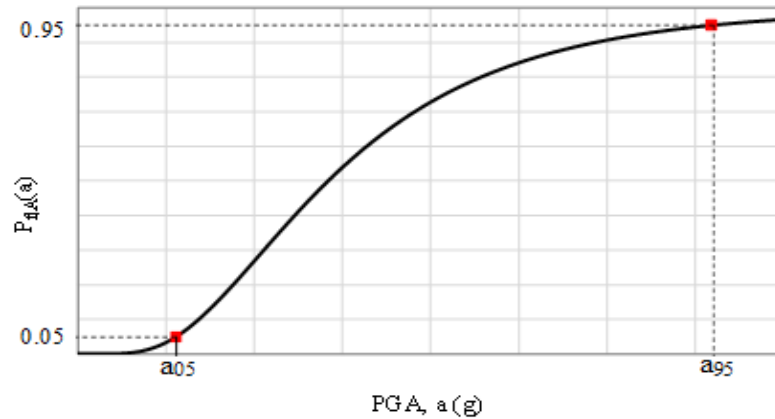
3.3 Pengembangan kurva fragilitas

Pada penelitian ini, dikembangkan kurva fragilitas median untuk setiap taraf kinerja yaitu FY (*First Yield*), IO (*Immediate Occupancy*), LS (*Life Safety*) dan CP (*Collapse Prevention*). Kurva median berasosiasi dengan tingkat kepercayaan $Q = 50\%$, sehingga persamaan (2) menjadi:

$$P_{f|A}(a) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{a}{a_m}\right)}{\beta_R}\right) \quad (3)$$

Pengembangan kurva fragilitas mengacu pada konsep yang diusulkan oleh Mangkoesebroto dkk (2019). Kurva fragilitas dibentuk dengan penentuan 2 titik acuan yaitu a_{05} dan a_{95} (Gambar 3). a_{05} dan a_{95} merupakan nilai PGA yang berasosiasi dengan peluang mencapai taraf kinerja tertentu sebesar 5% dan 95%. Kedua titik

acuan tersebut kemudian dihubungkan dengan penentuan parameter a_m dan β_R . Nilai a_{95} ditentukan dari analisis dinamis *nonlinear time history* (NLTHA) sedangkan parameter-parameter a_{05} , a_m dan β_R dihitung berdasarkan persamaan yang diusulkan oleh Mangkoesobroto dkk (2019). Dalam NLTHA, nilai PGA dari setiap gempa dinaikkan atau diturunkan sampai mencapai taraf kinerja tertentu, kemudian dicari PGA median (a_{95}) yg mewakili setiap taraf kinerja.



Gambar 3. Titik acuan pengembangan kurva fragilitas

Prosentase sendi plastis potensial yang terbentuk digunakan sebagai acuan dalam mendefinisikan kriteria dari setiap taraf kinerja. Kriteria untuk taraf kinerja CP yaitu 95 % dari semua sendi plastis potensial balok pada arah sumbu lemah sudah mencapai CP. Sedangkan untuk taraf kinerja FY, IO dan LS prosentase sendi plastis potensial yang terbentuk yaitu 50 %, 65 % dan 85 %. Untuk analisis statis *pushover* (NSP), digunakan nilai PGA pada titik *performance point* (PP). Ketika struktur mencapai taraf kinerja tertentu, dipastikan terjadi *beam sidesway mechanism*. Jika tidak maka struktur harus diperkuat.

3.4 Peluang kegagalan struktur

Peluang kegagalan struktur (P_f) merupakan hasil konvolusi antara kurva fragilitas median dengan kurva *hazard* median. Persamaan untuk menghitung nilai P_f yaitu:

$$P_f = \int_0^{\infty} H(a) dP_{f|A}(a) = \int_0^{\infty} H(a) \frac{dP_{f|A}(a)}{da} da \quad (4)$$

Suku pertama dari persamaan integral tersebut merupakan kurva *hazard* yang menyatakan peluang terlampauinya suatu nilai PGA dan suku kedua yaitu kurva fragilitas. Persamaan (4) dapat disederhanakan menjadi:

$$P_f = \Delta P_{f|A}(a) \sum_i H(a_i) \quad (5)$$

Suku pertama dari persamaan yaitu selang pada kurva fragilitas dan suku kedua yaitu jumlah ordinat pada kurva *hazard* yang bersesuaian dengan kurva fragilitas. Batas maksimum nilai P_f berdasarkan SNI 1726:2019 (2019) yaitu 2×10^{-4} per annum.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

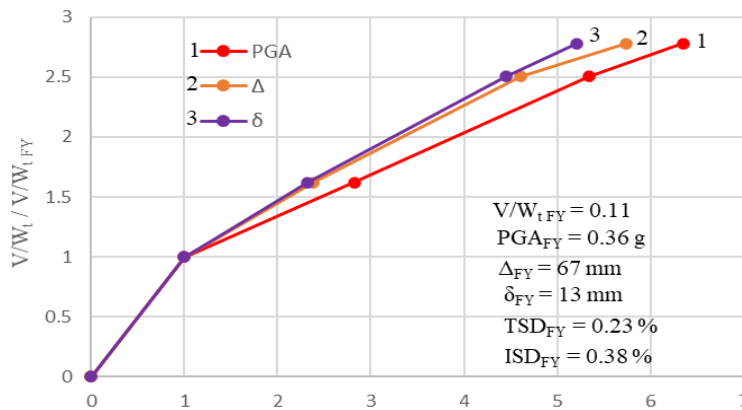
4.1 Analisis fragilitas struktur SRPMK

Periode struktur pada sumbu x yaitu 1.16 s dan pada sumbu y yaitu 1.31 s. Sehingga sumbu y merupakan sumbu lemah struktur. Beban dorong statis *pushover* (NSP) dikerjakan pada sumbu lemah struktur. Pada kondisi leleh pertama (*first yield*), besar gaya geser dasar yaitu 4138 kN dan perpindahan total 74 mm. *Demand* berdasarkan analisis *pushover* yaitu pada titik *performance point* (PP) dengan besar gaya geser dasar yaitu 5653 kN dan perpindahan total 159 mm. Kondisi struktur masih aman dan pada arah sumbu lemah struktur plastifikasi terjadi pada balok dengan taraf kinerja IO to Ls.

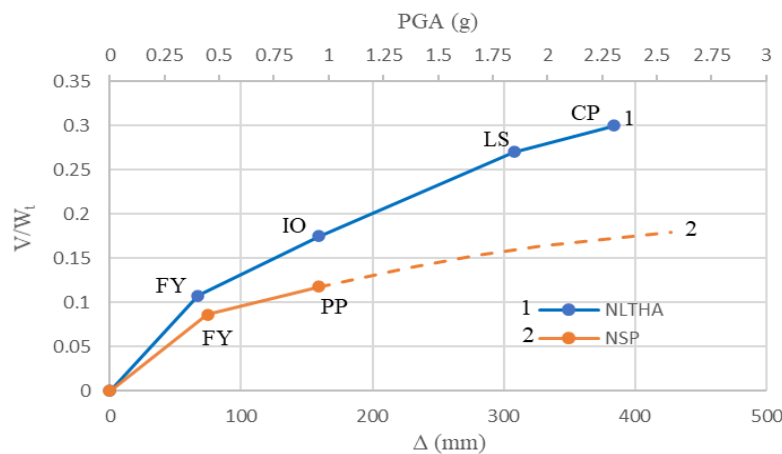
Nilai PGA untuk mencapai setiap taraf kinerja struktur (FY, IO, LS dan CP) didapat dari analisis dinamis *nonlinear time history* (NLTHA) dengan menaikkan dan menurunkan faktor skala gempa. Untuk mencapai taraf

kinerja CP, struktur perlu diperkuat karena terjadi plastifikasi pada kolom dasar dan tengah sehingga *beam sidesway mechanism* tidak tercapai. Kondisi ini dapat memicu terjadinya kegagalan *soft story* pada struktur. Kolom diperkuat dengan penambahan tulangan longitudinal sehingga prosentase tulangan menjadi 1.5 % dari desain awal 1 %. Nilai PGA median dari semua gempa digunakan sebagai PGA untuk setiap taraf kinerja yaitu 0.24 g (FY), 0.69 g (IO), 1.30 g (LS) dan 1.54 g (CP). Dari analisis dinamis, juga didapat nilai rerata gaya geser dasar, perpindahan total (Δ) dan perpindahan tiap tingkat struktur (δ). Besar gaya geser dasar untuk setiap taraf kinerja yaitu 5163 kN (FY), 8365 kN (IO), 12926 kN (LS) dan 14345 kN (CP). Sedangkan perpindahan total dan tiap tingkat struktur yaitu 67 mm & 13 mm (FY), 159 mm & 31 mm (IO), 308 mm & 59 mm (LS) dan 384 mm & 69 mm (CP). Berdasarkan SEAOC, Vision 2000 (1995) dan PEER (2010), nilai TSD (*Total Story Drift*) dan ISD (*Inter Story Drift*) untuk taraf kinerja CP yaitu 2.5 % dan 3 %. Struktur SRPMK hanya mampu mencapai TSD 1.35 % dan ISD 1.98 %. Sehingga dalam menentukan taraf kinerja, lebih realistis berdasarkan kondisi struktur atau elemen struktur.

Kurva nondimensional dari analisis dinamis ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan kurva tersebut, didapat nilai daktilitas struktur berdasarkan perpindahan total yaitu 5.74. Dalam mendesain struktur SRPMK, digunakan faktor modifikasi respons (R) yaitu 8. Sehingga daktilitas rencana struktur yaitu 5 ($\mu = R/1.6$). Nilai 1.6 merupakan faktor kuat lebih struktur (f_1). Daktilitas aktual struktur SRPMK melampaui daktilitas rencana struktur. Jika dibandingkan, *demand* berdasarkan analisis statis (titik PP) berbeda dengan analisis dinamis (taraf kinerja CP). Berdasarkan gambar 5, titik PP mendekati taraf kinerja IO. Titik PP dengan perpindahan total 159 mm berasosiasi dengan nilai PGA 0.68 g.



Gambar 4. Kurva nondimensional respons struktur SRPMK



Gambar 5. Perbandingan respons analisis statis (NSP) dengan dinamis (NLTHA)

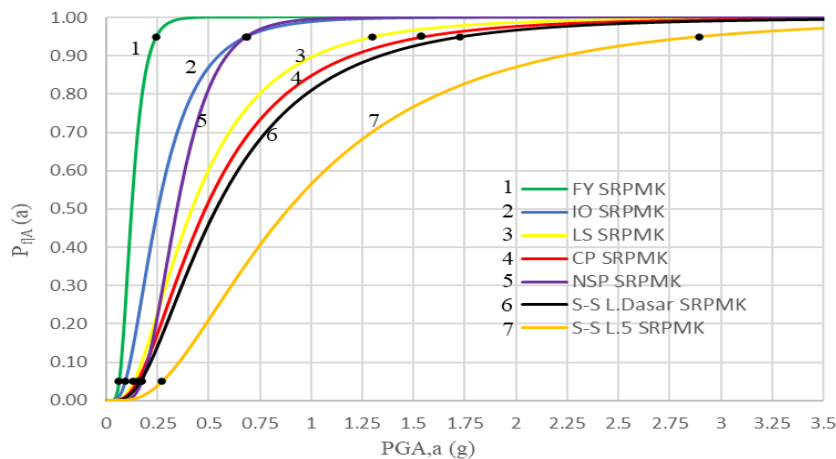
Untuk mengetahui pengaruh *soft story* terhadap fragilitas dan peluang kegagalan struktur, ditinjau 2 model struktur dengan *soft story* pada lantai dasar (SS L.D) dan lantai 5 (SS L.5). Dinding dimodelkan sebagai *rigid link* di setiap lantai yang tidak ditinjau mengalami *soft story*. Pada lantai yang ditinjau mengalami *soft story*, dinding tidak dimodelkan. Untuk struktur dengan *soft story*, akan dikembangkan kurva fragilitas untuk taraf kinerja CP. Kriteria untuk taraf kinerja CP yaitu 95 % dari semua sendi plastis potensial kolom pada lantai yang

ditinjau sudah mencapai *collapse*. Dari analisis dinamis *nonlinear time history*, didapat nilai PGA median untuk taraf kinerja CP yaitu 1.72 g (SS L.D) dan 2.89 g (SS L.5).

Setelah didapat nilai PGA median untuk setiap struktur (tanpa dan dengan *soft story*), maka dapat dikembangkan kurva fragilitas untuk setiap taraf kinerja. Parameter- parameter kurva fragilitas ditampilkan pada Tabel 2. Struktur dengan *soft story* memiliki nilai PGA *collapse* (CP) yang lebih besar dibandingkan struktur rangka. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, struktur SRPMK yang sudah diperkuat tidak retan terhadap bahaya *soft story*. *Soft story* pada lantai dasar lebih berbahaya dibandingkan pada lantai 5 karena dapat terjadi pada PGA yang lebih kecil.

Tabel 2. Parameter kurva fragilitas struktur SRPMK

Kurva Fragilitas	a_{05} (g)	a_{95} (g)	a_m (g)	β_R
FY (NLTHA)	0.06	0.24	0.12	0.42
IO (NLTHA)	0.09	0.69	0.25	0.61
LS (NLTHA)	0.13	1.30	0.42	0.69
CP (NLTHA)	0.15	1.54	0.48	0.71
PP (NSP)	0.17	0.68	0.34	0.42
<i>Soft Story</i> L.Dasar	0.17	1.72	0.53	0.71
<i>Soft Story</i> L.5	0.27	2.89	0.89	0.72



Gambar 6. Kurva fragilitas struktur SRPMK

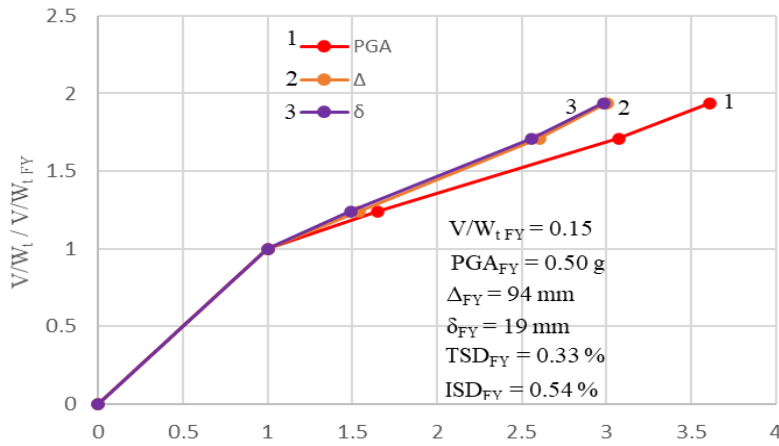
4.2 Analisis fragilitas struktur SRPMB

Analisis statis *pushover* juga dikerjakan pada arah sumbu lemah struktur yaitu sumbu y dengan periode 1.31 s. Pada kondisi leleh pertama (*first yield*), besar gaya geser dasar yaitu 7177 kN dan perpindahan total 134 mm. Sedangkan pada titik *performance point* (PP), besar gaya geser dasar yaitu 7853 kN dan perpindahan total 162 mm. Nilai PGA pada kondisi leleh pertama yaitu 0.52 g dan pada titik PP yaitu 0.64 g. Kondisi struktur masih aman. Pada arah sumbu lemah struktur, balok mengalami plastifikasi dengan taraf kinerja IO to Ls. Struktur SRPMB memiliki kurva kapasitas yang lebih besar dibandingkan struktur SRPMK. Ini karena struktur SRPMB memiliki luas tulangan desain yang lebih besar. Struktur SRPMK mencapai kondisi leleh pertama lebih dahulu tetapi memiliki kemampuan berdeformasi atau daktilitas yang lebih besar.

Untuk struktur SRPMB, kolom juga perlu diperkuat sehingga prosentase tulangan menjadi 1.5 % dari desain awal 1 %. Nilai PGA median untuk setiap taraf kinerja yaitu 0.34 g (FY), 0.56 g (IO), 1.04 g (LS) dan 1.23 g (CP). Besar gaya geser dasar untuk setiap taraf kinerja yaitu 7389 kN (FY), 9161 kN (IO), 12640 kN (LS) dan 14309 kN (CP). Sedangkan perpindahan total (Δ) dan tiang tingkat struktur (δ) yaitu 94 mm & 19 mm (FY), 145 mm & 28 mm (IO), 245 mm & 48 mm (LS) dan 283 mm & 56 mm (CP). Struktur SRPMB lebih rentan terhadap gempa karena nilai PGA *collapse* (CP) struktur lebih kecil dibandingkan struktur SRPMK. Syarat batas TSD dan ISD juga belum tercapai.

Berdasarkan kurva nondimensional (Gambar 7), daktilitas struktur SRPMB yaitu 3. Nilai daktilitas sudah melampaui daktilitas rencana yaitu 2 ($\mu = R/1.6$) dengan nilai R yaitu 3. Titik PP juga berasosiasi dengan taraf kinerja IO. Hasil analisis dinamis serupa dengan analisis statis. Struktur SRPMK mencapai kondisi leleh pertama

lebih dahulu tetapi memiliki daktilitas yang lebih besar. Daktilitas struktur SRPMK 1.9 kali lebih besar dibandingkan struktur SRPMB.

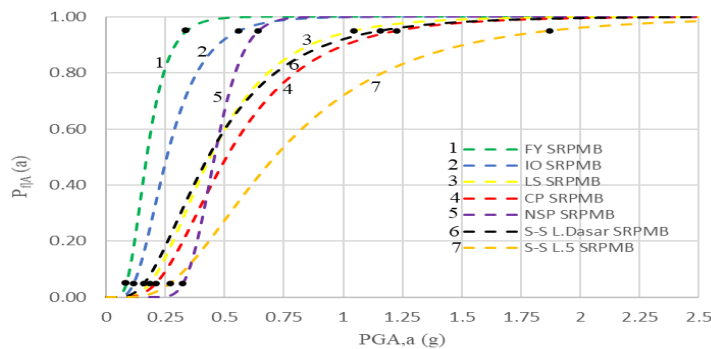


Gambar 7. Kurva nondimensional respons struktur SRPMB

Pengaruh *soft story* terhadap fragilitas dan peluang kegagalan struktur SRPMB juga ditinjau. Dari analisis dinamis, didapat nilai PGA median untuk taraf kinerja CP yaitu 1.16 g (SS L.D) dan 1.87 g (SS L.5). Parameter-parameter kurva fragilitas ditampilkan pada Tabel 3. Nilai PGA *collapse* (CP) struktur SS L.D lebih kecil dibandingkan dengan struktur rangka. Jika dilihat dari nilai PGA *collapse*, maka struktur SRPMB rentan terhadap *soft story* pada lantai dasar.

Tabel 3. Parameter kurva fragilitas struktur SRPMB

Kurva Fragilitas	a05 (g)	a95 (g)	am (g)	β_R
FY (NLTHA)	0.08	0.34	0.17	0.42
IO (NLTHA)	0.12	0.56	0.26	0.48
LS (NLTHA)	0.18	1.04	0.44	0.53
CP (NLTHA)	0.21	1.23	0.51	0.54
PP (NSP)	0.32	0.64	0.46	0.21
<i>Soft Story</i> L.Dasar	0.16	1.16	0.43	0.6
<i>Soft Story</i> L.5	0.27	1.87	0.71	0.59



Gambar 8. Kurva fragilitas struktur SRPMB

4.3 Peluang kegagalan struktur

Nilai peluang kegagalan (P_f) untuk semua struktur ditampilkan pada Tabel 4. Berdasarkan SNI 1726-2019 (2019), batasan nilai P_f yaitu 2×10^{-4} per *annum*. Pada kondisi *collapse* (CP), struktur SRPMB memiliki nilai P_f yang lebih kecil dibandingkan struktur SRPMK. Sehingga struktur SRPMB yang sudah diperkuat merupakan struktur yang paling kokoh menahan beban gempa. Luas tulangan desain mempengaruhi perilaku struktur.

Struktur SRPMB mencapai kondisi leleh pertama pada nilai PGA yang lebih besar karena luas tulangan desainnya lebih besar dibandingkan struktur SRPMK. Sehingga kurva fragilitas struktur SRPMB lebih bergeser ke kanan pada bagian bawah kurva. Karena daktilitas yang tinggi, struktur SRPMK memiliki nilai PGA *collapse* (CP) yang lebih besar. Tetapi jika dihitung nilai P_f untuk setiap taraf kinerja, struktur SRPMB tetap memberikan nilai yang lebih kecil. Ini karena adanya nilai PGA median maksimum yang membatasi perhitungan nilai P_f . Peluang terlampaui ($H(a)$) bernilai nol untuk PGA diatas PGA maksimum sehingga tidak mempengaruhi perhitungan nilai P_f . Untuk struktur dengan *soft story*, nilai P_f sudah lebih kecil dari nilai batas sehingga kedua struktur tidak rentan terhadap *soft story*. *Soft story* pada lantai dasar lebih berpeluang terjadi jika dibandingkan pada lantai 5 karena memiliki nilai P_f yang lebih besar.

Tabel 4. Nilai P_f struktur (Target kinerja, PG (CP) = 2×10^{-4})

Kurva Fragilitas	P_f	
	SRPMK	SRPMB
NLTHA (FY)	2.346E-03	1.040E-03
NLTHA (IO)	6.830E-04	4.004E-04
NLTHA (LS)	2.393E-04	8.167E-05
NLTHA (CP)	1.705E-04	4.910E-05
NSP*	1.125E-04	2.774E-07
<i>Soft Story</i> L.Dasar	1.285E-04	1.346E-04
<i>Soft Story</i> L.5	2.479E-05	1.881E-05

(*) = Struktur tanpa perkuatan

5 KESIMPULAN

Pada *demand* berdasarkan NSP dan NLTHA pada PGA desain, struktur dalam kondisi aman dan tidak diperlukan perkuatan struktur. Tetapi untuk mencapai taraf kinerja CP dengan aman (*fail safe mode*) yaitu plastifikasi terjadi pada balok dan kolom dasar, kolom perlu diperkuat. Sehingga rasio kuat nominal kolom-balok yang diperlukan lebih besar dari persyaratan SNI 2847:2019 (2019). Nilai P_f struktur SRPMB yang diperkuat lebih kecil dibandingkan struktur SRPMK yang diperkuat, sehingga struktur SRPMB dengan perkuatan dapat digunakan pada daerah rawan gempa. Struktur yang diperkuat tidak rentan dengan bahaya *soft story* dan *soft story* pada lantai dasar lebih berpeluang terjadi dibandingkan pada lantai atas. Direkomendasikan menggunakan NLTHA untuk evaluasi seismik struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Astriana, L., Sangadji, S., Purwanto, E. and Kristiawan, S. A. 2016 Assessing seismic performance of moment resisting frame and frame-shear wall system using seismic fragility curve. *Procedia Engineering*, 171, 1069-1076, 2016.
- BSN. 2019. *SNI 1726:2019 (Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung)*. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta.
- BSN. 2019. *SNI 2847:2019 (Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan)*. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta.
- BSN. 2020. *SNI 1727:2020 (Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain)*. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta.
- IAEA. 2005. *Safety reports series No. 41 (Safety of new and existing research reactor facilities in relation to external events)*. International Atomic Energy Agency (IAEA), Austria.
- Ibrahim, Y. E., Shallan, O., El-Shihi, A. and Selim, M. 2016 Assessment of seismic damage of multistory structures using fragility curves. *Journal of Enginnering Research and Applications*, 6, 63-72.
- Kennedy, R. P. and Ravindra, M. K. 1984 Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies. *Nuclear Engineering and Design*, 79, 47-68.
- Mangkoesoebroto, S. P. and Parithusta, R. 2005. *Seismic hazard analysis of the Bandung Nuclear Reactor site*. PT Propenta Persisten Indonesia, Bandung.
- Mangkoesoebroto, S.P., Prayoga, M.H., and Parithusta, R. 2019 Collapse Risks of Fail-Safe RC Frames Due to Earthquakes: Fragility Assessments. *J. Eng. Technol. Sci.*, 51, 479-500.
- Mohammadi, M., Mirzaeni, M., and Pashaie, M.R. 2021 Seismic performance and fragility analysis of infilled steel frame structures using a new multi-strut model. *Institution of Structural Engineers, Elsevier, Structure*, 34, 1403-1415.
- Nazri, F. M., Tan, C. G. and Aqilah Saruddin, S. N. 2017 Fragility curves of regular and irregular moment-resisting concrete and steel frames. *International Journal of Civil Enginnering*.
- PEER. 2010. *Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings*. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California.
- PEER. 2022. *Ground Motion Database*. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California.
- SEAOC. 1995. *Performance based seismic engineering of buildings*. Structural Engineering Association of California (SEAOC), California.