



Korelasi Perilaku Struktur Bangunan Berdasarkan Parameter R , C_d dan Ω Terhadap Tingkat Kinerja pada Beragam Simulasi Gempa

Eka Faisal Nurhidayatullah^{1*}, Dwi Kurniati¹, Samsul Ryandi Maradika²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Teknologi Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55285, Indonesia.

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, 76127, Indonesia.

*Email korespondensi: eka.faisal@staff.uty.ac.id

Diterima April 2022; Disetujui Juli 2022; Dipublikasi Juli 2022

Abstract: This research was conducted by modeling the reinforced concrete structure according to the existing conditions. Nonlinear static pushover analysis was carried out by giving monotonous lateral static loads until the structure reached an inelastic nonlinear state which was known from its capacity curve. The frequent, rare and very rare earthquake scenarios are given to the building structure so that the level of performance is known. The performance of the simulated building for each earthquake level is correlated with the parameters R , C_d and Ω of the actual building structure. The parameter values of R_{aktual} , Ω_{aktual} and $C_{daktual}$ represent the strength, stiffness and ductility of building structure are in good condition. The degradation of stiffness and strength due to an increase of base shear occurs faster when the earthquake acts at Y than X direction of building. Small, design and large earthquake simulations show immediate occupancy buildings' performance level so that the structure is included in very good category. The presence of shear walls on all four sides of the building is suspected as the cause. Improving the quality of building structure performance can be done by modifying the structural parameters R , C_d and Ω . In existing buildings, can be done by retrofitting, adding shear walls, braces or passive control devices neither seismic dampers nor base isolation.

Keywords: earthquake, structural engineering, performance of building structure, modification of structural parameters

Abstrak: Penelitian ini dilakukan dengan memodelkan struktur bangunan beton bertulang sesuai kondisi eksisting. Dilakukan analisis *nonlinear static pushover* dengan memberikan beban lateral statik secara monoton sampai struktur mencapai keadaan nonlinear inelastik yang diketahui dari kurva kapasitasnya. Skenario gempa kecil, desain serta besar diberikan pada struktur bangunan hingga diketahui tingkat kinerjanya. Kinerja bangunan hasil simulasi gempa dikorelasi dengan parameter R , C_d dan Ω aktual struktur bangunan. Nilai parameter R_{aktual} , Ω_{aktual} dan $C_{daktual}$ merepresentasikan kekuatan, kekakuan dan daktilitas struktur bangunan yang baik. Degradasi kekakuan maupun kekuatan akibat peningkatan *base shear* lebih cepat terjadi ketika gempa bekerja pada arah sumbu Y dibandingkan dengan sumbu X. Simulasi gempa kecil, desain dan besar menunjukkan tingkat kinerja *immediate occupancy* sehingga struktur bangunan termasuk dalam kategori sangat baik. Terdapatnya *shear wall* pada keempat sisi bangunan ditengarai sebagai penyebabnya. Memperbaiki kualitas kinerja struktur bangunan dapat dilakukan dengan memodifikasi parameter struktur R , C_d dan Ω . Pada bangunan eksisting bisa dilakukan dengan *retrofitting*, menambahkan perkuatan berupa dinding geser, bresing, atau *passive control device* baik *seismic damper* maupun *base isolation*.

Kata kunci : gempa, rekayasa struktur, kinerja struktur bangunan, modifikasi parameter struktur

Indonesia memiliki panduan perencanaan bangunan tahan gempa sejak tahun 1983, yang kemudian terus diperbaharui selama kurun waktu tertentu yaitu tahun 2002, 2010 dan terakhir tahun 2019. Dengan demikian sebenarnya Indonesia sudah lama menggunakan gempa sebagai acuan perencanaan infrastruktur. Namun pengalaman Gempa merusak sebelumnya menunjukkan bahwa masih banyak bangunan yang didesain dan dilaksanakan secara teknis runtuh.



Gambar 1. Keruntuhan Gedung Akibat Gempa Jogja 2006 (Makrup, 2013)

Ilmu kegempaan semakin berkembang pesat sehingga banyak ditemukan adanya sumber gempa baru termasuk sesar aktif serta peningkatan nilai percepatan gempa pada beberapa daerah ((Pusgen), 2017). Ilmu kegempaan semakin berkembang sedangkan kondisi bangunan eksisting tidak berubah. Hal tersebut memunculkan adanya kekhawatiran terutama terhadap kondisi struktur bangunan eksisting.

Permasalahan tersebut tidak hanya dialami oleh Indonesia saja namun banyak negara maju di dunia cenderung menghadapi hal yang sama (Suhendro, 2022). Maka dari itu mitigasi kebencanaan terutama kaitanya dengan struktur bangunan eksisting penting untuk dilakukan. Salah satu upaya yang bisa dilakukan yaitu dengan melakukan rekayasa struktur guna meningkatkan performanya. Supaya tindakan yang dikerjakan sesuai maka perlu diketahui terlebih dahulu

bagaimana perilaku nonlinear serta kondisi struktur bangunan eksisting terhadap simulasi beragam kejadian gempa. Pendekatan *performancebased design* dengan metode *nonlinear static pushover analysis* merupakan salah satu yang kerap digunakan. Pendekatan nonlinear dipandang paling sesuai karena mampu merepresentasikan kondisi bangunan yang tidak lagi elastik ketika gempa besar terjadi.

Dengan *nonlinear static pushover analysis* diperoleh kurva kapasitas struktur bangunan yang merupakan hubungan antara gaya dan perpindahan atap. Kurva kapasitas dinilai sangat penting menggambarkan bagaimana kerusakan struktur bangunan ketika gempa terjadi. Dari kurva tersebut dapat diketahui respons dan perilaku struktur bangunan ketika terkena gaya gempa. Melalui kurva tersebut dapat diketahui parameter koefisien modifikasi respons (R), perbesaran defleksi (C_d) dan *overstrength* (Ω) yang merepresentasikan kekuatan, daktilitas, redundansi dan kemampuan struktur dalam mendissipasi energi gempa (Julian et al, 2014).

Analisis kinerja struktur bangunan secara lebih lanjut perlu dilakukan dengan beragam simulasi level kejadian gempa berdasarkan kala ulangnya yaitu gempa yaitu gempa kecil (*frequent*) gempa sedang (*rare*) dan gempa sangat besar (*very rare*) untuk mengetahui bagaimana kinerjanya secara lebih mendetail (SEAOC Vision, 2000). Korelasi antara parameter nonlinear struktur baik R , Ω dan C_d dengan tingkat kinerja bangunan perlu diketahui untuk mengetahui kebutuhan rekayasa struktur yang diperlukan.

Apabila diperoleh kinerja yang kurang baik

atau tidak sesuai dengan *performance* bangunan yang diinginkan maka parameter tersebut perlu dimodifikasi dengan melakukan rekayasa struktur seperti perkuatan, *retrofitting*, *seismic damper*, dan *base isolation* (Suhendro, 2022).

KAJIAN PUSTAKA

Nonlinear Static Pushover Analysis

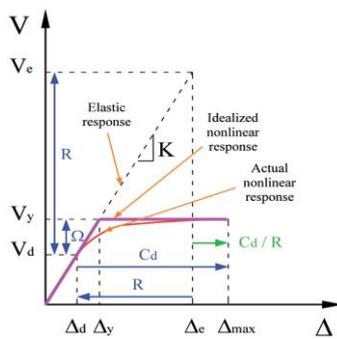
(Hassabala, et al., 2014) melakukan evaluasi kinerja struktur terhadap bangunan residensial 4 tingkat. Analisis dilakukan dengan memberi gaya lateral sesuai dengan UBC 97 sehingga dari kurva kapasitasnya diketahui bahwa struktur sudah berada dalam kondisi nonlinear. Dari hasil analisis pushover diketahui bahwa kondisi bangunan kemungkinan kurang baik apabila gempa besar terjadi atau berada dalam kinerja *Life Safety* (LS) hingga *Collapse Prevention* (Cp). Sebagian besar sendi plastis beberapa elemen struktur baik balok maupun kolom sudah masuk dalam kategori *life safety* (LS) dan *collapse prevention* (CP). (Daniel & John, 2016) melakukan asesmen kinerja struktur bangunan gedung beton bertulang bertingkat tinggi dengan menggunakan metode analisis pushover. Pushover dilakukan hingga bangunan berada dalam kondisi inelastik. Berdasarkan hasil studi diperoleh bahwa maksimum kapasitas *base shear* sudah melebihi gaya geser desain. Hirarki terbentuknya plastisitas pada elemen struktur menunjukkan bahwa pola *strong column weak beam* sudah tercapai terbukti dengan kerusakan lokal cenderung didominasi oleh elemen balok terlebih dahulu dibandingkan kolom dengan 77,6% kerusakan struktur dengan kondisi *life safety* terjadi pada arah beban dorong sumbu x sedangkan 84,56% terjadi pada arah sumbu Y. Bangunan tergolong aman dari

asumsi level gempa yang diberikan berdasarkan kapasitas base shearnya.

Kebanyakan penelitian yang berkaitan dengan pushover analisis sebelumnya hanya membahas tentang kinerja struktur berdasarkan titik kinerja yang merupakan pertemuan antara kurva kapasitas dan spektrum demand serta proses plastisifikasi pada elemen struktur bangunan. Namun, demand spektrum yang digunakan belum secara spesifik mengindikasikan seberapa besar beban gempa yang diberikan. Selain itu pada studi sebelumnya belum melakukan analisis mendetail berkaitan dengan kurva kapasitas yang merupakan hubungan antara gaya geser dasar dan simpangan atap salah satu hal paling penting dari hasil pushover analisis yang bisa menjelaskan tentang banyak hal kaitannya dengan perilaku struktur bangunan.

Parameter R, C_d dan Ω

Kurva kapasitas merupakan kurva yang mampu menggambarkan bagaimana perilaku inelastik atau kerusakan bangunan ketika gempa terjadi. Melalui kurva tersebut bisa diketahui bagaimana koefisien modifikasi respons (R), faktor perbesaran defleksi (C_d) dan nilai faktor kuat lebih (Ω). ketiganya merupakan parameter desain yang penting dan terdapat pada hampir seluruh peraturan desain bangunan di dunia termasuk Indonesia. Ketiga parameter tersebut merepresentasikan bagaimana kekuatan, daktilitas, redundansi serta kemampuan struktur dalam mendissipasi energi gempa. (Julian et al, 2014)



Gambar 2. General response structure (Julian et al, 2014)

Pengalaman dan observasi terhadap perilaku struktur bangunan berdasarkan kejadian gempa masa lalu menunjukkan bahwa kinerja utama *life safety* masih tercapai dengan desain secara ekonomis hanya menggunakan sebagian kecil saja dari gaya gempa elastik (SEAOC, 2008). Filosofi peraturan desain bangunan tahan gempa pada umumnya memang mengizinkan struktur bangunan mengalami deformasi inelastik pada kejadian gempa sangat kuat (Julian et al, 2014). Supaya perilaku struktur bangunan ideal tercapai maka diperlukan parameter R , C_d dan Ω yang sesuai (SEAOC, 2008). Dalam perencanaan bangunan, gaya gempa desain diperoleh dari gempa elastik dibagi dengan *strength reduction factor* (R). Besaran faktor tersebut merepresentasikan bagaimana kemampuan struktur dalam mendissipasi energi gempa (Hussein et al., 2021). Penggunaan faktor modifikasi respons didasarkan pada asumsi bahwa sistem struktur yang kompleks mampu bertahan pada kondisi deformasi inelastik yang besar tanpa mengalami keruntuhan. Selain itu struktur mampu mengerahkan kekuatan jauh melebihi desain kapasitasnya. Faktor tersebut menentukan kinerja nonlinear dari struktur bangunan pada saat mengalami gempa kuat (Abdi et

al., 2019). Nilai R memperkecil nilai gaya geser dasar guna memastikan bahwa struktur dapat berada pada keadaan inelastik jika gempa desain atau lebih besar terjadi.

$$R = \frac{V_e}{V_d} \quad (1)$$

Keterangan:

R = Faktor modifikasi respons

V_e = Gaya geser dasar elastis (kN)

V_d = Gaya geser dasar desain (kN)

Faktor *overstrength* (Ω) merupakan kekuatan tambahan struktur bangunan setelah kekuatan maksimumnya, v_d tercapai. Biasanya diperhitungkan sebagai berikut.

$$\Omega = \frac{V_y}{V_d} \quad (2)$$

Keterangan:

Ω = Faktor *overstrength*

V_y = Gaya geser dasar leleh (kN)

V_d = Gaya geser dasar desain (kN)

Pembedaan nilai *overstrength* antara bangunan satu dengan yang lain dipengaruhi oleh sistem struktur, tingkat seismisitas, mutu material, redundansi, serta elemen penahan gaya lateral yang berpartisipasi meredam gaya seismik (SEAOC, 2008).

Sedangkan parameter faktor perbesaran defleksi C_d digunakan supaya struktur bangunan mampu mencapai kondisi *displacement* inelastik yang diharapkan setelah batas perpindahan elastik terlampaui. Dalam proses desain, gaya gempa kondisi elastik (V_e) direduksi dengan faktor modifikasi respons (R) menjadi gaya gempa tereduksi (V_d). Gaya gempa tersebut digunakan dalam desain komponen struktur secara linear. Δ_d terlalu kecil apabila digunakan sebagai batas

displacement kerukakan bangunan. Oleh karena itu nilai C_d digunakan dalam peraturan desain seismik untuk mengkoreksi nilai tersebut. Supaya diperoleh respons inelastik maksimum bangunan sehingga kinerja bangunan bisa mendekati perilaku ideal yang diharapkan.

$$Cd = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_d} \quad (3)$$

Keterangan:

C_d = Faktor Perbesaran Defleksi

Δ_{max} = *Displacement* maksimum (kN)

Δ_d = *Displacement* desain (kN)

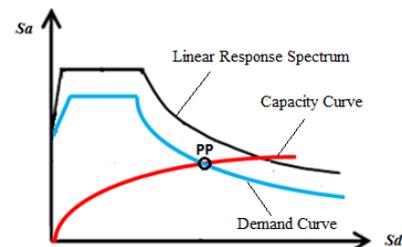
Perbedaan parameter R , C_d dan Ω juga menandakan bahwa setiap jenis struktur bangunan memiliki beragam batasan keruntuhan yang dalam peraturan biasanya direpresentasikan sebagai maksimum drift. Struktur dengan perilaku yang baik apabila dilihat dari besaran parameter R , C_d dan Ω cenderung memiliki batasan keruntuhan lebih besar. Saat ini faktor R , C_d maupun Ω yang tercantum dalam peraturan desain bangunan tahan gempa pada berbagai belahan dunia misalnya Amerika, Meksiko termasuk Indonesia merupakan hasil dari observasi pengalaman kaitanya dengan perbedaan kinerja struktur bangunan terhadap kejadian gempa besar masa lampau, hasil konsensus, *judgment* serta justifikasi para ahli di bidang teknik sipil serta kegunaan.

Menurut (Hussein et al. , 2021) perlu dilakukan berbagai pengujian untuk memperoleh nilai R , C_d dan Ω yang ideal baik melalui analisis numerik maupun uji laboratorium. Studi lebih lanjut, komprehensif, dan mendalam diperlukan pada isu ini karena sekarang ini desain, konfigurasi dan sistem struktur bangunan cenderung semakin rumit. Para ahli struktur perlu terus berusaha

mengembangkan desain struktur bangunan yang semakin praktis, ekonomis serta aman (Abdi et al, 2019). Analisis nilai R , C_d dan Ω berdasarkan kurva kapasitas struktur bangunan secara mendalam penting dilakukan untuk mengetahui bagaimana perilakunya terhadap gempa. Hasil analisis juga secara tidak langsung menentukan bagaimana kinerja struktur bangunan terhadap ketika gempa terjadi.

Kinerja Struktur Bangunan

Analisis kinerja struktur bangunan secara lebih lanjut perlu dilakukan dengan memberikan beragam simulasi tingkat kejadian gempa ditinjau dari kala ulangnya yaitu gempa kecil (*frequent*), gempa sedang (*rare*) dan gempa sangat besar (*very rare*). Hal tersebut dilksuksn supaya secara lebih detail diketahui bagaimana pengaruh parameter R , C_d dan Ω bangunan terhadap tingkat kinerja psda kondisi level beban gempa yang berbeda-beda (SEAOC, 2008).



Gambar 3. Performance Point (Santos et al., 2018)

Kinerja struktur bangunan dalam memikul beban gempa direpresentasikan oleh pertemuan antara *demand spectrum* dengan *capacity spectrum* yang disebut sebagai titik kinerja. *Demand spectrum* menggambarkan bagaimana gempa yang memiliki karakter dinamis bekerja pada suatu bangunan sedangkan kurva kapasitas merepresentasikan bagaimana response struktur bangunan ketika menerima gaya lateral. Oleh

karena itu *performance point* menggambarkan bagaimana kondisi struktur bangunan ketika mengalami suatu gempa (Nurhidayatullah & Kurniati, 2021)

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_a \cdot g \quad (4)$$

Keterangan:

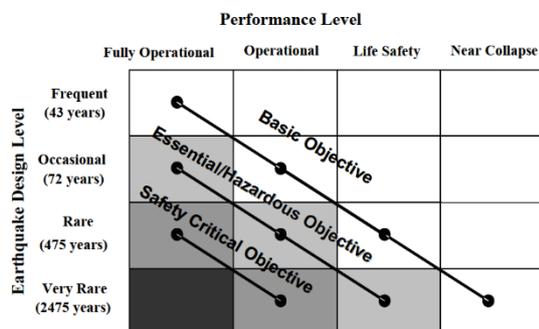
S_{di} = Spectral displacement (mm)

T_i = Waktu (dt)

S_{ai} = Spectral acceleration (g)

g = Percepatan gravitasi (mm/d^2)

Apabila diperoleh kinerja yang kurang baik atau tidak sesuai dengan ekspektasi, Parameter R , C_d dan Ω tersebut dapat dimodifikasi dengan melakukan rekayasa struktur seperti memberikan perkuatan, *retrofitting*, seismic damper, dan base isolation untuk bangunan kondisi eksisting (Suhendro, 2022).



Gambar 4. Performance Objective Matrix (SEAOC, 2008)

METODE PENELITIAN

1. Pengumpulan data

Objek penelitian merupakan bangunan eksisting rusunawa 4 tingkat yang terletak di kabupaten Magelang. Data yang digunakan dalam penelitian diantaranya struktur, arsitektur, hasil uji N-SPT atau sondir tanah setempat serta kuat tekan beton dan

tarik baja.

2. Pemodelan struktur bangunan dan analisis pushover

Analisis pushover dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu, membuat model struktur bangunan sesuai kondisi eksisting, menentukan kriteria plastifikasi elemen struktur, memberikan beban hidup dan mati (beban gravitasi), serta melakukan iterasi secara numerik dengan mensimulasikan beban statik lateral secara monoton sampai keadaan nonlinear in-elastik struktur bangunan serta target *displacement* keruntuhannya tercapai.

Beban hidup, beban mati serta beban lateral pushover analisis diperhitungkan berdasarkan peraturan Indonesia terbaru yaitu SNI 1727: 2020 (BSN, 2020), SNI 1726: 2019 ((BSN), 2019) dan peta gempa 2017 ((Pusgen), 2017). Berdasarkan analisis diperoleh kurva kapasitas bangunan yang merupakan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap (*roof displacement*).

3. Analisis Response Spektrum Gempa

Simulasi beban gempa dalam studi ini menggunakan level gempa kecil (*frequent*) atau *serviceability level earthquake* (SLE) dengan probability 10 % dalam 10 tahun, gempa rare atau *Design Basis Earthquake* (DBE) dengan probability gempa 10% dalam 50 tahun serta gempa sangat besar (*very rare*) setingkat *Maximum Considered Earthquake* (MCE) dengan probability 2% dalam 50 tahun. Analisis gempa masing-masing periode ulang dilakukan dengan pendekatan sesuai dengan kondisi seismisitas terbaru di Indonesia berdasarkan peta sumber bahaya gempa tahun 2017 ((Pusgen), 2017).

4. Analisis Parameter R , C_d dan Ω

Dari kurva kapasitas hasil analisis pushover kemudian dianalisis besaran parameter modifikasi response bangunan (R), perbesaran defleksi (C_d) serta *overstrength* (Ω). Ketiga parameter tersebut merepresentasikan bagaimana kekakuan, kekuatan, daktilitas, redundansi, kemampuan struktur dalam mendissipasi energi gempa, serta batasan keruntuhan struktur apabila dilihat dari inelastik drift rasionya. Kemudian nilai R , C_d maupun Ω hasil analisis dibandingkan dengan yang tercantum dalam peraturan desain bangunan tahan gempa SNI 1726 : 2019 sehingga diketahui apakah respons inelastik bangunan sehingga sudah mendekati perilaku ideal yang diharapkan serta batasan drift ratio in-elastik struktur bangunan bisa tercapai.

5. *Performance Point* dan Level Kinerja Bangunan

Performance point merupakan hasil pertemuan antara *spectrum demand* dan *spectrum capacity*. Spektrum demand merupakan hasil konversi dari response spektrum beberapa level gempa. Sedangkan *capacity spectrum* merupakan hasil konversi dari kurva kapasitas. Kedua variabel perlu dikonversi dalam format yang sama (ADRS) supaya bisa diplot dalam satu grafik. Pertemuan kedua kurva tersebut menjelaskan seberapa besar rasio *drift* bangunan dalam kondisi inelastik nonlinear terjadi ketika simulasi gempa dilakukan. Besaran rasio drift bangunan tersebut merepresentasikan bagaimana kinerja dan seberapa besar kerusakan yang diderita oleh bangunan.

6. Korelasi Parameter R , C_d dan Ω dengan kinerja bangunan

Dilakukan pembahasan secara mendetail berkaitan dengan korelasi antara hasil analisis parameter R , C_d dan Ω yang telah dilakukan

terhadap *performance point*, kinerja bangunan serta *performance objective matrix* untuk mengetahui bagaimana pengaruh serta rekomendasi rekayasa struktur bangunan mengacu pada parameter R , C_d dan Ω demi tercapainya *performance* bangunan yang diharapkan.

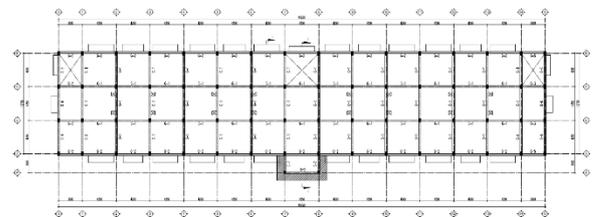
HASIL DAN PEMBAHASAN

Objek Penelitian

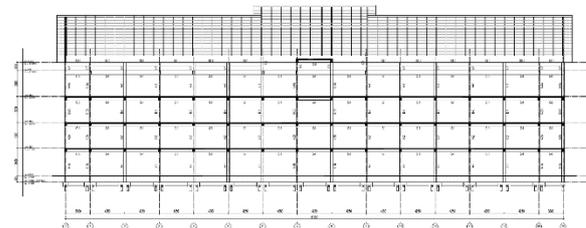
Objek penelitian merupakan bangunan rusunawa struktur beton bertulang 4 tingkat yang berlokasi di Magelang, Jawa tengah.



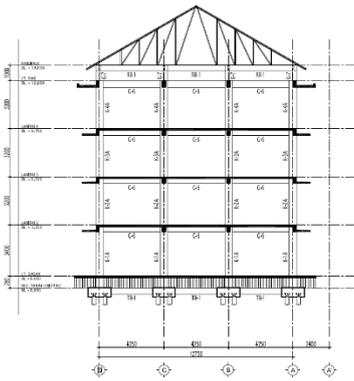
Gambar 5. Peta Jawa Tengah (Mandala, 2015)



Gambar 6. Denah Struktur Bangunan

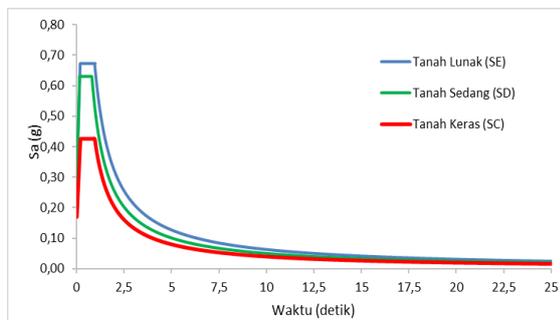


Gambar 7. Potongan Memanjang Bangunan



Gambar 8. Potongan Melintang Bangunan

Diperoleh data hasil uji material yaitu kuat tekan beton (f'_c) = 25 MPa, tegangan leleh baja (f_y) = 390 MPa serta tegangan ultimit (f_u) = 500 MPa sebagai acuan dalam pemodelan material struktur bangunan. Pada penelitian ini tidak didapatkan data hasil uji tanah lapangan karena arsipnya sudah tidak bisa ditekuni sehingga data tanah menggunakan asumsi kondisi kegempaan yang terburuk berdasarkan klasifikasi situs setempat sebagai berikut.

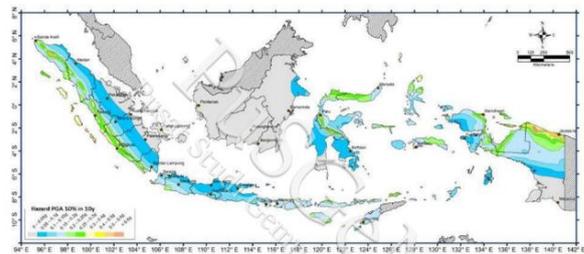


Gambar 9. Perbandingan Respon Spektrum Berdasarkan Tipe Tanah

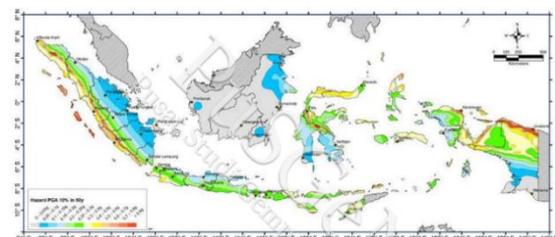
Berdasarkan grafik diketahui bahwa respons spektrum gempa dengan situs tanah lunak merupakan yang terbesar. Kondisi tanah lunak memicu terjadinya percepatan gempa paling besar pada permukaan tanah sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan struktur bangunan paling parah diantara klasifikasi situs lainnya. Maka studi ini meninjau kondisi tanah lunak.

Simulasi Response Spektrum Gempa

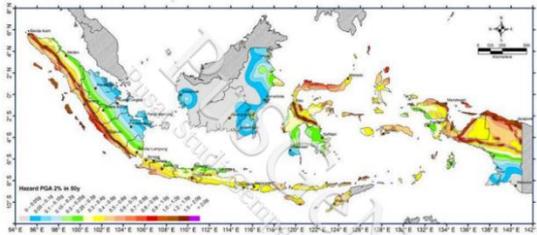
Hasil analisis sesuai dengan SNI 1729:2019 dan peta gempa 2017 diperoleh bahwa bangunan termasuk dalam kategori desain seismik D dengan tingkat kerentanan gempa yang tinggi. Menurut (SEAOC, 2008) perlu dilakukan beragam simulasi gempa dengan intensitas yang berbeda untuk mengetahui secara detail beragam kondisi struktur bangunan ketika mengalami kejadian gempa. Beberapa level gempa yang perlu ditinjau untuk melakukan asesmen dalam rangka retrofitting bangunan yaitu SLE (*Service Level Earthquake*) dengan periode ulang gempa 100 tahunan, DBE (*Design Basis Earthquake*) dengan periode ulang 500 tahunan serta MCE (*Maximum Considered Earthquake*) dengan kala ulang 2500 tahunan. Skenario gempa tersebut didasarkan pada peta seismisitas Indonesia terbaru yang dirilis oleh ((Pusgen), 2017).



Gambar 10. Peta Percepatan puncak batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 10 tahun ((Pusgen), 2017)

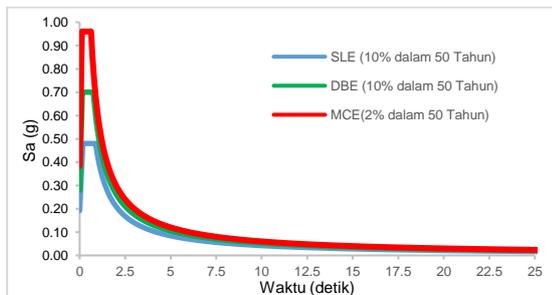


Gambar 11. Peta Percepatan puncak batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun ((Pusgen), 2017)



Gambar 12. Peta Percepatan puncak batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun ((Pusgen), 2017)

Peta gempa menunjukkan seberapa besar potensi percepatan gempa yang terjadi pada batuan dasar, untuk mengetahui bagaimana keadaan gempa di permukaan tanah perlu dirambatkan melalui media berupa tanah lunak sesuai hasil analisis sebelumnya. Pada proses perambatan gelombang gempa, besaran amplifikasi diperhitungkan sesuai dengan ketentuan SNI 1726: 2019 Tabel 12 ((BSN), 2019). Hasil analisis perambatan gelombang gempa diperoleh simulasi gempa kondisi permukaan tanah dalam bentuk response spektrum pada setiap tingkatan gempa sebagai berikut.



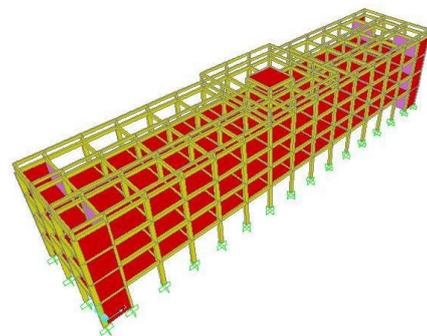
Gambar 13. Response spektrum gempa SLE, DBE dan MCE

Berdasarkan gambar terlihat bahwa intensitas percepatan gempa sangat dipengaruhi oleh periode ulangnya. Semakin lama periode ulang maka semakin besar percepatan gempa yang terjadi sedangkan semakin pendek tinjauan rentang kala ulang maka semakin kecil percepatan gempunya. Hal tersebut mengindikasikan bahwa skenario

gempa sudah sesuai dengan karakteristik kejadian gempa sebenarnya bahwa gempa yang kerap terjadi terjadi merupakan gempa dengan magnitudo kecil hingga sedang sedangkan gempa dengan magnitudo besar jarang terjadi (Nurhidayatullah & Kurniati, 2020). Hasil analisis respons spektrum gempa sudah menggambarkan bagaimana karakteristiknya yang dinamis yaitu gempa datang dengan percepatan sedang sesaat kemudian mencapai percepatan puncak dan secara perlahan menghilang dalam hitungan detik.

Pemodelan dan Pushover Analysis Struktur Bangunan

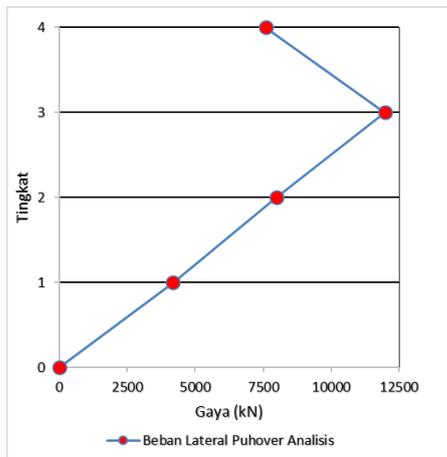
Pushover analisis dilakukan dengan terlebih dahulu memodelkan struktur bangunan dengan bantuan software SAP 2000 sesuai dengan kondisi eksisting.



Gambar 14. Model Struktur Bangunan

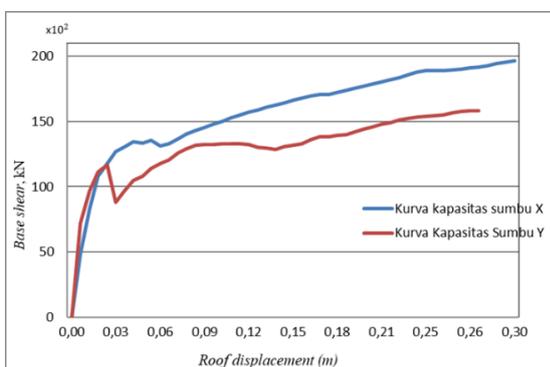
Beban mati pada struktur bangunan sesuai dengan data material dan kondisi konfigurasi model struktur bangunan eksisting sedangkan besaran beban hidup diestimasi dengan standar perencanaan bangunan Indonesia terbaru yaitu SNI 1727:2020 (BSN, 2020). Beban dorong lateral statik pushover analysis diperhitungkan berdasarkan SNI 1726: 2019 ((BSN), 2019) dengan memperhitungkan gempa ekivalen statik lateral dengan kondisi gempa elastik dengan nilai faktor modifikasi respons, $R =$

1 sehingga diperoleh nominal gaya lateral sebagai berikut,



Gambar 15. Beban lateral pushover analysis

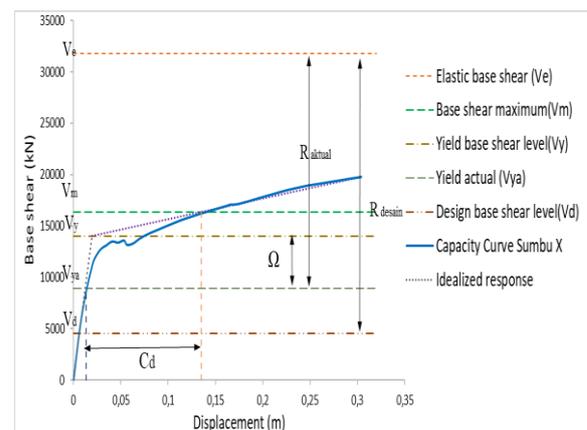
Beban lateral diberikan pada setiap lantai tepatnya pada joint balok kolom secara bertahap monoton dari kecil hingga kondisi elastik tercapai sehingga diharapkan struktur bangunan sudah berada dalam kondisi nonlinear inelastik atau mengalami keruntuhan. Keadaan non linear dilihat dari kurva kapasitas hasil analisis pushover menggambarkan tahapan keruntuhan struktur bangunan. Pushover analisis dilakukan pada kedua arah sumbu bangunan sehingga diperoleh kurva kapasitas sumbu x dan sumbu y.



Gambar 16. Kurva kapasitas bangunan

Kedua kurva kapasitas menunjukkan bagaimana perilaku struktur bangunan ketika

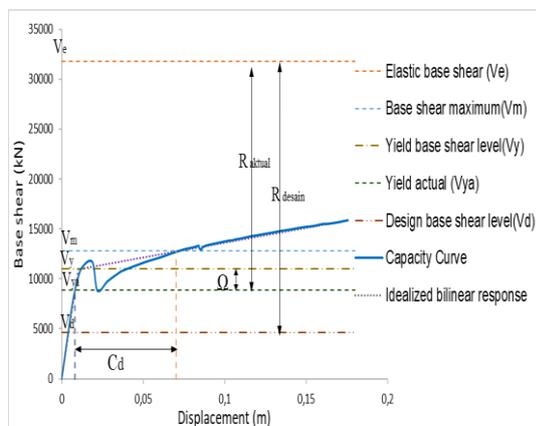
menerima beban lateral hingga struktur bangunan berada dalam kondisi nonlinear inelastik. Tampak kedua kurva tersebut merepresentasikan bagaimana perilaku struktur bangunan. Pada kondisi gaya geser dasar kecil struktur masih berada dalam kondisi linear elastik kemudian berangsur-angsur berubah menjadi nonlinear elastik dalam keadaan gaya geser yang semakin besar. Fase nonlinear kurva kapasitas menunjukkan bahwa degradasi kekuatan maupun kekakuan sudah terjadi. Secara lebih detail bagaimana menginterpretasikan perilaku struktur bangunan terhadap gempa pada kedua arah serta pebedaannya diketahui melalui parameter R , Ω dan C_d yang secara detail dianalisis kurang lebih sebagai berikut.



Gambar 17. Kurva kapasitas sumbu X

Analisis parameter R , Ω dan C_d berdasarkan kurva kapasitas sumbu x diperoleh nilai faktor modifikasi respon kondisi aktual (R_{aktual}) struktur bangunan eksisting sama dengan 3,57 menunjukkan bahwa nilai tersebut lebih kecil R_{desain} untuk sistem struktur ganda *shearwal* khusus yaitu 8 ((BSN), 2019). Hal tersebut disebabkan kondisi gaya geser leleh struktur bangunan (V_{ya}) mengalami peningkatan cukup signifikan dibandingkan kondisi gaya geser desain (V_d). Peningkatan kondisi batas pelelehan struktur

bangunan tersebut berarti bahwa struktur mampu menerima gaya lateral atau gempa dengan batasan *displacement* elastik lebih besar apabila dibandingkan dengan desainnya. Hal tersebut juga mengindikasikan bahwa tingkat kekakuan dan kekuatan struktur semakin tinggi sehingga mampu meredam gaya gempa yang cukup besar dan masih berada dalam kondisi linear elastik (tidak mengalami kerusakan permanen). Peningkatan *base shear yield* aktual (V_{ya}) menyebabkan selisih antara *base shear yield* (V_y) idealisasi kurva atau bisa disebut faktor *overstrength* (Ω_{aktual}) = 1,573 lebih kecil dari $\Omega_{desain} = 2,5$. Meskipun begitu analisis faktor perbesaran defleksi (C_d aktual) diperoleh nilai 10 lebih besar dari desain yang hanya 5,5. Artinya yaitu meskipun berdasarkan Ω , struktur memiliki cadangan kekuatan kecil namun gedung memiliki daktilitas yang tinggi yang berarti bahwa setelah bangunan mencapai batasan lelehnya, struktur masih dapat berdeformasi dalam kondisi nonlinear sampai mencapai batas deformasi maksimumnya yaitu 10 kali *displacement* elastiknya. Kemudian analisis kurva kapasitas sumbu Y secara detail adalah sebagai berikut,



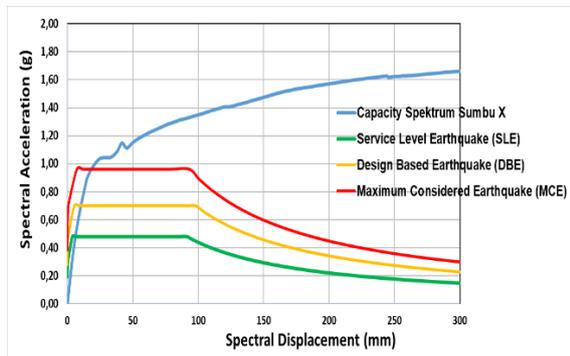
Gambar 18. Kurva kapasitas sumbu Y

Berdasarkan analisis diperoleh angka faktor

modifikasi respon kondisi aktual (R_{aktual}) struktur bangunan eksisting sebesar 3,57 kurang dari R_{desain} . Nilai R_{aktual} bangunan pada kedua sumbu cenderung memiliki nilai yang sama bermakna bahwa batas leleh aktual serta kekakuan elastiknya identik. Hal itu mengindikasikan bahwa struktur mempunyai kekakuan serta kekuatan yang mirip pada kedua arah sumbu bangunan. Faktor Ω_{aktual} sumbu sebesar 1,367 lebih kecil dari pada sumbu x menunjukkan bahwa *safety factor* atau cadangan kekuatan struktur pada kondisi elastis cenderung lebih kecil sehingga struktur diprediksi akan lebih cepat masuk ke dalam zona nonlinear apabila gempa terjadi pada arah sumbu Y dibandingkan sumbu X. Kemiringan kurva fase nonlinear menunjukkan bahwa degradasi kekakuan dan kekuatan akibat peningkatan *base shear* akan lebih cepat terjadi pada arah sumbu Y dibanding dengan sumbu X. Analisis faktor perbesaran defleksi (C_d) diperoleh nilai 8,75 menunjukkan perilaku yang sangat daktil bahwa setelah struktur bangunan mencapai batas pelelehan masih mampu bertahan dalam kondisi deformasi plastis sampai mencapai limitnya sebesar 8,75 kali *displacement* elastik.

Kurva kapasitas hasil analisis sudah menjelaskan bagaimana perilaku struktur bangunan ketika menerima gaya dorong secara lateral yang merepresentasikan kejadian gempa. Potensi kejadian gempa di setiap daerah berbeda tergantung bagaimana historis kegempaan wilayah tersebut (Nurhidayatullah & Kurniati, 2020). Analisis kinerja struktur bangunan terhadap potensi kegempaan suatu daerah secara lebih detail perlu dilakukan dalam proses asesmen sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana. Dalam hal ini perlu dilakukan skenario simulasi beragam periode ulang

gempa yang merepresentasikan kejadian gempa kecil (*Service Level Earthquake*), desain (*Design Basis Earthquake*) serta gempa besar (*Maximum Considered Earthquake*).

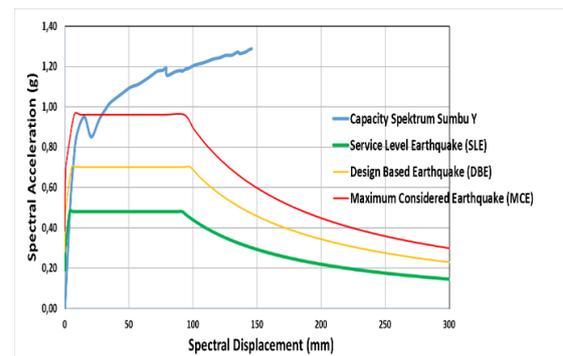


Gambar 19. Performance point sumbu X bangunan

Kinerja struktur bangunan dalam memikul beban gempa direpresentasikan oleh pertemuan antara *demand spectrum* dengan *capacity spectrum* yang disebut sebagai titik kinerja. *Demand spectrum* menggambarkan bagaimana gempa yang memiliki karakter dinamis bekerja pada suatu bangunan sedangkan kurva kapasitas merepresentasikan bagaimana response struktur bangunan ketika menerima gaya lateral maka *performance point* menggambarkan bagaimana kondisi struktur bangunan ketika terkena suatu gempa dengan level tertentu.

Berdasarkan simulasi beban gempa yang bekerja pada arah sumbu x diketahui bahwa gempa dengan kala ulang 50 tahunan atau *service level earthquake* membuat bangunan berdeformasi masih dalam kondisi elastik sehingga ketika gempa menghilang maka akan kembali seperti semula. *Performance point* menunjukkan angka *drift ratio* sebesar 0,06% sehingga bangunan berada dalam kategori kinerja *immediate occupancy* ((ATC), 2005). Simulasi gempa dengan kala ulang 500 tahunan atau *design based earthquake* ketika

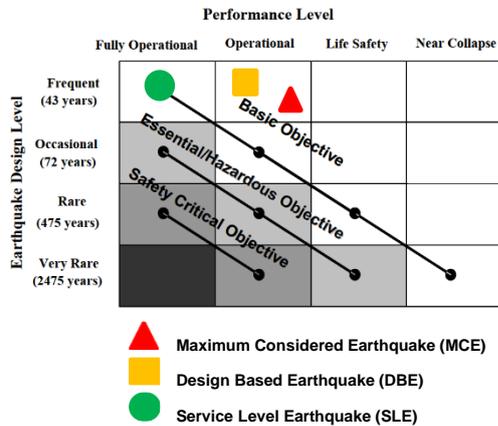
bekerja pada struktur bangunan kemudian membuat bangunan berdeformasi masih dalam kondisi elastik. *Performance point* menunjukkan angka *drift ratio* simpangan bangunan sebesar 0,11% berada dalam kategori kinerja *immediate occupancy* ((ATC), 2005). Sedangkan Simulasi gempa dengan kala ulang 2500 tahunan atau *Maximum Considered Earthquake* (MCE) ketika bekerja pada struktur bangunan kemudian membuat bangunan berdeformasi sudah mulai berada pada batas dalam nonlinear inelastik sehingga ketika gempa menghilang maka terdapat beberapa elemen struktur yang berdeformasi platis (permanen). Namun *Performance point* menunjukkan angka *drift ratio* sebesar 0,2% termasuk kategori kinerja *immediate occupancy* ((ATC), 2005)



Gambar 20. Performance point sumbu Y bangunan

Berdasarkan simulasi beban gempa yang diberikan pada sumbu y diketahui bahwa gempa *service level earthquake* pada struktur bangunan menyebabkan terjadinya deformasi kondisi elastik. Dari *Performance point* diperoleh *drift* sebesar 0,06% termasuk dalam kinerja *immediate occupancy* ((ATC), 2005). Simulasi *design based earthquake* dikenakan pada struktur bangunan memicu terjadinya deformasi elastik dengan angka drift sebesar 0,11% termasuk dalam kinerja *immediate occupancy*. Sedangkan Simulasi

Maximum Considered Earthquake membuat simpangan sudah mulai berada pada batas nonlinear inelastik dengan drift ratio sebesar 0,2%, namun masih masuk dalam kategori kinerja *immediate occupancy*.



Gambar 21. Performance Objective Matrix (SEAOC, 2008)

Apabila tingkat kinerja bangunan hasil analisis titik kinerja diplot dalam *performance objective matrix* (SEAOC, 2008). terlihat bahwa kinerja struktur bangunan sudah memenuhi syarat yang diharapkan bahkan termasuk dalam kategori sangat baik. Ketika terkena gempa *very rare* maupun *rare* maka dengan sedikit perbaikan elemen non struktural yang rusak misalnya lampu, mekanikal elektrik dan lain-lain pada bangunan kemudian bangunan bisa digunakan kembali. Sedangkan apabila terkena gempa level *frequent*, secara penuh tetap bisa beroperasi. Adanya elemen struktur *shear wall* pada keempat sisi muka atau tampak bangunan ditengarai yang memicu kinerja bangunan tergolong sangat baik. Penggunaan *shear wall* dapat meningkatkan kekakuan struktur, mengurangi lateral *displacement* dan *storey drift* secara signifikan (Tarigan, J. et al, 2018). Berdasarkan hasil analisis *kurva kapasitas* pada kedua sumbu bangunan menunjukkan bahwa adanya dinding

geser menyebabkan kekakuan tinggi sehingga sehingga bangunan mampu menerima gaya geser dasar (gempa) dengan intensitas yang besar serta tetap berada pada kondisi linear elastik (Tanpa kerusakan struktur permanen).

Memperbaiki kualitas kinerja struktur bangunan dapat dilakukan dengan memodifikasi parameter R , C_d dan Ω . Pada bangunan eksisting yaitu dengan melakukan *retrofitting* serta menambahkan perkuatan berupa dinding geser, bresing, atau *passive control device* yaitu *seismic damper* atau *base isolation*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- Parameter R_{aktual} , Ω_{aktual} dan C_d aktual struktur bangunan merepresentasikan kekakuan dan kekuatan struktur yang tinggi sehingga mampu meredam gaya gempa cukup besar dalam kondisi linear elastik (tanpa mengalami kerusakan struktur permanen), daktilitas yang baik berarti bahwa setelah bangunan masuk dalam fase nonlinear masih dapat terus berdeformasi plastis besar secara signifikan, degradasi kekakuan dan kekuatan akibat peningkatan *base shear* akan lebih cepat terjadi pada arah sumbu Y dibanding dengan sumbu X.
- Kinerja struktur bangunan sudah memenuhi syarat yang diharapkan bahkan termasuk dalam kategori sangat baik. Ketika terkena gempa *very rare* maupun *rare* maka dengan sedikit perbaikan elemen non struktural yang rusak misalnya lampu, mekanikal elektrik dan lain-lain bangunan bisa digunakan kembali. Sedangkan apabila terkena gempa level *frequent*, secara penuh tetap bisa beroperasi.

Adanya *shear wall* pada keempat sisi bangunan ditengarai sebagai penyebabnya.

- Memperbaiki kualitas kinerja struktur bangunan dapat dilakukan dengan memodifikasi parameter R , C_d dan Ω . Pada bangunan eksisting bisa dilakukan dengan *retrofitting*, menambahkan perkuatan berupa dinding geser, bresing, atau *passive control device* baik *seismic damper* maupun *base isolation*.

Saran

- Perlu dilakukan penelitian lebih detail berkaitan dengan pengaruh retrofitting serta perkuatan berupa dinding geser, bresing, atau *passive control device* yaitu *seismic damper* atau *base isolation* terhadap parameter struktur R_{aktual} , Ω_{aktual} dan $C_{d \text{ aktual}}$
- Perlu dilakukan analisis *nonlinear time history* untuk menguji *performance* struktur bangunan eksisting

DAFTAR PUSTAKA

(ATC), A. T. (2005). *FEMA 440 Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington, D.C., United States Of America (USA): Federal Emergency Management (FEMA).

(BSN), B. S. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta: BSN.

(Pusgen), P. S. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan

Pengembangan Kementerian PUPR. (USGS), U. S. (2022, 03 25). <https://earthquake.usgs.gov/>. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquake/s/map>

Abdi et al. (2019). Response modification factor - Review paper. *Sustainable Civil and Construction Engineering Conference IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* . 357, pp. 1 - 16. IOP Publishing. doi:doi:10.1088/1755-1315/357/1/012003

Brzev, S., & Sherstobitoff, J. (2014, Juni 3). An Innovative Application of Damping Devices in Seismic Upgrade of a Water Reservoir. *12WCEE 2000 : 12th World Conference on Earthquake Engineering*.

BSN, B. S. (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Struktur Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: BSN.

Daniel , D. M., & John, S. T. (2016, Oktober). Pushover Analysis of RC Building. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(10), 88 - 92.

Hassabala, et al. (2014). Pushover Analysis of Existing 4 Storey RC Flat Slab Building. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 16(2), 242 - 257.

Hussein et al. . (2021, May). Seismic response modification factor for RC-. *Cogent*

- Engineering*, 8, 1 - 20.
doi:<https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1923363>
- Julian et al. (2014). Analysis of the Earthquake Resistant Design Approach. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 151-162.
- Makrup, L. (2013). *Seismic Hazard untuk Indonesia*. Yogyakarta : Graha Ilmu .
- Mandala, E. (2015 , Maret 13). <https://www.pinhome.id/> . Retrieved from <https://www.pinhome.id/blog/peta-jawa-tengah/>
- Nurhidayatullah , E. F., & Kurniati , D. (2020, Desember 3). Pemetaan Spectral Acceleration Daerah Yogyakarta dengan Pendekatan Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-UNAND)*, 16(3), 217 - 229 .
doi:<https://doi.org/10.25077/jrs.16.3.217-229.2020>
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2021, Maret). Potensi Kerusakan Bangunan Bertingkat Sedang dengan Skenario Gempa Lebih Besar Sama Dengan 5 SR Sebagai Upaya Mitigasi Kebencanaan di Yogyakarta. *Teras Jurnal*, 11(1), 125 - 139.
doi:<http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.409>
- Prawirodikromo, W. (2012). Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan. In *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan* (p. 20). Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Santos et al. (2018). A Comparative Study Of Korelasi Perilaku Struktur... (Nurhidayatullah, Kurniati, & Maradika, 2022)
- Some Seismic Codes For Building Design Regarding Criteria For Nonlinear Method Of Analysis. *16th European Conference On Earthquake Engineering* . Thessaloniki .
- SEAOC. (2008, September). A Brief Guide to Seismic Design Factors. *Structure Magazine*, pp. 30 - 32.
- Suhendro, B. (2022, Januari 8). *Desain Seismik Untuk Struktur dengan Sistem Peredam (Studi Kasus Visco Elastic Damper)*. Retrieved from Webinar HAKI: <https://www.youtube.com/watch?v=ijdfHShX21o>
- Tarigan, J. et al. (2018). The effect of shear wall location in resisting earthquake. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 309 (pp. 1 - 6). IOP Publishing. doi:[doi:10.1088/1757-899X/309/1/012077](https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012077)