

# POTENSI KERUSAKAN BANGUNAN BERTINGKAT SEDANG DENGAN SKENARIO GEMPA LEBIH BESAR SAMA DENGAN 5 SR SEBAGAI UPAYA MITIGASI BENCANA DI YOGYAKARTA

Eka Faisal Nurhidayatullah<sup>1)</sup>, Dwi Kurniati<sup>2)</sup>

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Teknologi Yogyakarta  
Jl. Glagahsari No.63 D.I. Yogyakarta 55164

Email: [eka.faisal@staff.uty.ac.id](mailto:eka.faisal@staff.uty.ac.id)<sup>1)</sup>, [dwi.kurniati@staff.uty.ac.id](mailto:dwi.kurniati@staff.uty.ac.id)<sup>2)</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.409>

(Received: November 2020 / Revised: January 2021 / Accepted: January 2021)

## Abstrak

Yogyakarta merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang mempunyai tingkat aktivitas kegempaan tinggi. Sejarah mencatat bahwa Yogyakarta berulang kali mengalami kejadian gempa merusak. Salah satu upaya pemerintah guna meminimalisir risiko gempa yaitu dengan menerbitkan dan memperbaharui peta gempa setiap periode tertentu. Studi terbaru menunjukkan bahwa nilai akselerasi gempa di beberapa daerah mengalami peningkatan dibandingkan dengan percepatan gempa terbaru tahun 2017. Peningkatan nilai akselerasi gempa tersebut menimbulkan kekhawatiran terutama terhadap kondisi bangunan eksisting, oleh karena itu perlu dilakukan prediksi akurat tentang bagaimana potensi kerusakan bangunan eksisting terhadap gempa besar kemungkinan terjadi sebagai upaya mitigasi bencana. Studi ini menggunakan data gempa dengan magnitude  $\geq 5$  Mw dari rentang waktu tahun 1900 sampai 2020 dengan radius 500 km terhadap objek penelitian. *Probabilistic seismic hazard analysis* digunakan untuk mendapatkan respon spektrum gempa probabilitas 2% dalam 50 tahun. *Pushover analysis* dilakukan dengan memodelkan bangunan eksisting untuk mendapatkan kurva kapasitas. *Performance point* didapatkan dari pertemuan antara kurva kapasitas dengan response spektrum. Kurva kapasitas juga digunakan untuk menentukan *median spectral displacement* yang berfungsi dalam pembuatan *fragility curve*. Plotting antara *performance point* dengan *fragility curve* menghasilkan potensi kerusakan bangunan. Apabila gempa besar terjadi pada arah sumbu x potensi bangunan tidak mengalami kerusakan sama sekali sebesar 0,465%, rusak ringan 4,959%, sedang 45,940%, berat 37,880% dan hampir runtuh 10,756%. Sedangkan apabila gempa besar terjadi pada arah sumbu y potensi tidak terjadi kerusakan sama sekali yaitu 0,465%, rusak ringan 4,959%, sedang 45,940%, berat 37,880% dan hampir runtuh 10,756%. Potensi kerusakan bangunan akibat gempa besar didominasi oleh kerusakan sedang.

Kata kunci: *Gempa, Probabilistic seismic hazard analysis, Pushover analysis, Fragility curve, Potensi kerusakan bangunan*

## Abstract

Yogyakarta is one of the provinces in Indonesia which has a high level of seismicity. Yogyakarta has experienced destructive earthquakes repeatedly. One of the government's efforts to minimize the risk of earthquakes is by publishing and updating earthquake maps provisionally. Recent studies have shown that the earthquake acceleration in several areas has increased compared to the acceleration of the latest map. This increase raises concerns, especially regarding to the existing buildings. As disaster mitigation effort, it is necessary to make accurate predictions

about how potential damage of existing buildings is likely to occur. This study used earthquakes data with magnitude of  $\geq 5$  Mw from 1900 to 2020 with a radius of 500 km toward the building. Probabilistic seismic hazard analysis was used to obtain response spectrum of 2% probability in 50 years. Pushover analysis was performed by modeling the existing building to obtain capacity curve. Performance point was obtained from the meeting between capacity curve and response spectrum. Capacity curve was also used to determine the median spectral displacement to build fragility curve. The plotting results between performance point and fragility curve is building's damage potential. If a big earthquake occurs in the x-axis direction, the potential of no damage is 0.465%, slight 4.959%, moderate 45.940%, extensive 37.880% and nearly collapse 10.756%. Meanwhile, if a big earthquake occurs in the y-axis direction, Potential of no damage is 0.465%, slight 4.959%, moderate 45.940%, extensive 37.880% and 10.756% almost collapse. The building's damage potential is dominated by moderate.

Keywords: *Earthquakes, Probabilistic seismic hazard analysis, Pushover analysis, Fragility curve, Building's damage potential*

## 1. Latar Belakang

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) memiliki tingkat aktivitas kegempaan yang tinggi karena letaknya pada jalur cincin api pasifik, perbatasan dua pelat besar dunia yaitu Australia di selatan dan Eurasia di utara serta banyaknya sumber gempa sesar aktif disekitarnya (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Sejarah mencatat bahwa Yogyakarta telah berulang kali mengalami bencana gempa besar yang merugikan. Pada tanggal 27 Mei 2006, gempa berkekuatan 6,3 SR menghantam wilayah tersebut menyebabkan ribuan korban jiwa serta kerugian triliunan triliunan rupiah (BAPPENAS, 2006). Banyaknya korban meninggal dipicu oleh keruntuhan bangunan yang tidak mampu menahan guncangan gempa.

Pemerintah Indonesia sejak tahun 1983 sudah menerbitkan peta hazard gempa sebagai acuan perencanaan bangunan tahan gempa untuk meminimalisir risiko bencana gempa bumi. Secara berkala peta gempa tersebut terus diperbaharui seiring dengan dinamisme perkembangan ilmu kegempaan yang ada. Namun kejadian gempa Jogja 2006 dan gempa bumi lain di wilayah Indonesia seperti Padang dan Sulawesi menunjukkan tidak hanya bangunan non teknis (*non-engineered building*) namun bangunan teknis (*engineered building*) masih banyak mengalami kerusakan (Makrup, 2013).

Sampai saat ini peta sumber bahaya gempa tahun 2017 merupakan peta gempa terbaru yang dirilis oleh pemerintah. Pada peta gempa tersebut ditemukan banyak sumber gempa sesar aktif baru yang memicu adanya peningkatan aktivitas seismik pada beberapa daerah di Indonesia dibandingkan dengan peta versi sebelumnya yaitu peta tahun 2010. Ilmu pengetahuan kegempaan yang dinamis dan terus berkembang memungkinkan diketahui adanya peningkatan aktivitas seismik di berbagai daerah di Indonesia. Berdasarkan studi terbaru yang dilakukan Saputra *et al.* (2020) diketahui bahwa nilai percepatan puncak permukaan tanah probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun di kabupaten riau mencapai angka 0,78g sedangkan pada peta gempa tahun 2017 hanya 0,3g. Perbedaan yang cukup signifikan menunjukkan bahwa risiko kegempaan di wilayah provinsi Riau cenderung lebih tinggi. Hal tersebut patut menjadi kewaspadaan bagi banyak pihak karena peningkatan aktivitas seismik kemungkinan tidak hanya terjadi di provinsi Riau saja namun bisa terjadi di daerah yang lain termasuk Yogyakarta.

Kemungkinan terjadinya peningkatan nilai akselerasi gempa memunculkan kekhawatiran terhadap kondisi bangunan yang sudah berdiri saat ini. Padahal setelah kejadian gempa jogja 2006 pembangunan gedung bertingkat justru semakin pesat seiring dengan majunya perekonomian kota Yogyakarta. Maka dari itu, merujuk pada penelitian (Saputra et al., 2020) serta mengingat begitu besarnya kerugian yang diakibatkan oleh gempa sebelumnya maka perlu dilakukan upaya mitigasi yang lebih spesifik dengan data gempa terbaru guna meminimalisir kerusakan apabila bencana serupa terjadi di masa mendatang. Diperlukan prediksi akurat tentang bagaimana potensi kerusakan bangunan bertingkat terhadap gempa besar yang mungkin terjadi dengan analisis mutakhir. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai masukan bagi tim penyusun peta gempa nasional berkaitan dengan kondisi kegempaan di wilayah Yogyakarta serta rekomendasi perlunya rehabilitasi atau retrofitting bangunan eksisting di Yogyakarta sebagai upaya mitigasi dalam rangka menurunkan tingkat resiko bencana gempa bumi.

Secara lebih spesifik tujuan dilakukan penelitian yaitu mengetahui skenario gempa besar dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dalam bentuk kurva *uniform hazard spectra*, serta bagaimana potensi kerusakan bangunan eksisting beton bertulang bertingkat sedang yang berlokasi di Kota Yogyakarta apabila terkena gempa tersebut.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian merupakan gedung bertingkat sedang dengan struktur beton bertulang yang berfungsi sebagai rusunawa.



Gambar 1 Objek penelitian

Gedung terletak di kota Yogyakarta dengan koordinat 7,786 °S dan 110,81°E.



Gambar 2 Peta Yogyakarta

(Sumber: <https://taufiqadi.wordpress.com>)

Gedung tersebut dibangun tahun 2007 dan direncanakan berdasarkan peraturan beton struktural dan kegunaan yang sudah cukup lama.

## 2.2 Alur Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahapan, yaitu pengumpulan data gempa dan bangunan, *probabilistic seismic hazard analysis*, pemodelan dan *pushover analysis*, analisis titik kinerja bangunan, pembuatan *fragility curve*, serta analisis potensi kerusakan bangunan.

### 2.2.1 Pengumpulan Data

Data gempa terdiri dari magnitude, waktu kejadian, koordinat, serta kedalaman sumber gempa. Digunakan data gempa dengan magnitude  $\geq 5$  Mw dari rentang waktu tahun 1900 sampai 2019 dengan radius 500 km dari objek penelitian. Data tersebut diperoleh dari katalog rekaman gempa *United States Geological Survey* (USGS), *National Centers For Environmental Information* (NOAA) dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Sedangkan data bangunan berupa data perencanaan baik struktural maupun nonstruktural bangunan. Data tersebut didapatkan dari (*Detail Engineering Desain* (DED), data uji material beton dan baja tulangan, serta survei terhadap kondisi bangunan eksisting.

### 2.2.2 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

*Probabilistik Seismic Hazard Analysis* merupakan metode pendekatan probabilistik guna memprediksi guncangan gempa bumi yang kemungkinan terjadi dengan memperhitungkan pengaruh ketidakpastian gempa baik magnitude, lokasi maupun waktu kejadian berdasarkan historis kegempaan masa lalu suatu daerah (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Menurut Pusgen (2017) metode analisis gempa dengan pendekatan probabilistik dilakukan melalui tahapan sebagai berikut.

1. Konversi data gempa;

Konversi data gempa perlu dilakukan melihat data gempa yang diperoleh dari berbagai sumber masih terdiri dari beragam tipe diantaranya magnitude *local* (*M<sub>l</sub>*), magnitude *body* (*M<sub>b</sub>*), magnitude *surface* (*M<sub>s</sub>*) dan magnitude momen (*M<sub>w</sub>*) (Asrurifak, 2016). Seluruh data gempa dikonversi dalam magnitude momen (*M<sub>w</sub>*) dengan nilai kevalidan data terbaik diantara yang lain mengacu pada metode konversi beberapa skala magnitude untuk wilayah Indonesia (Irsyam, 2010).

2. Declustering data gempa;

*Declustering* dilakukan dengan model matematika Reasenber (1985) terhadap data gempa guna mengeliminasi gempa ikutan (*fore dan after shock*) karena dalam analisis seismik probabilistik hanya digunakan data gempa utama (*main shock*) saja (Saputra et al., 2020).

3. Identifikasi sumber gempa;

Pengelompokkan sumber gempa ditentukan sesuai dengan mekanisme kejadian gempa di Yogyakarta dan sekitarnya. Pada umumnya mekanisme gempa di Indonesia terbagi menjadi tiga yaitu sumber gempa sesar (*shallow crustal*), subduksi megathrust (*interface*) dan *benioff* (*intraslab*) (Irsyam, 2010).

4. Karakterisasi sumber gempa;  
Selanjutnya model analisis *maximum likelihood* digunakan untuk memperhitungkan parameter karakteristik tiap sumber gempa yaitu nilai  $a$  dan  $b$  serta, *magnitude of completeness* ( $M_c$ ) berdasarkan data historis kegempaan suatu daerah.
5. Menanalisis akselerasi gerakan tanah menggunakan *ground motion prediction equation* (GMPE) pada berbagai magnitudo dan lokasi gempa;  
Pemilihan fungsi atenuasi gerakan tanah yang sesuai dengan kondisi geologi dan seismisitas suatu daerah merupakan salah satu hal paling penting dalam PSHA. Hal tersebut dikarenakan sampai saat ini belum ada persamaan atenuasi yang dikembangkan di wilayah Indonesia berkaitan dengan masih terbatasnya teknologi perekaman data gempa di Indonesia (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Persamaan atenuasi yang digunakan dalam studi ini merujuk pada hasil penelitian *Next Generation Attenuation (NGA) projects*. Sumber gempa *shallow crustal* diperhitungkan dengan fungsi atenuasi Campbell-Bozorgonia NGA (2008) :

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{site} + f_{sed} \quad (1)$$

Keterangan

$f_{mag}$	= fungsi magnitudo
$f_{dis}$	= fungsi jarak lokasi terhadap sumber gempa
$f_{flt}$	= fungsi jenis patahan
$f_{sed}$	= fungsi hanging wall

Sedangkan gempa dengan mekanisme subduksi *interface* maupun *intraslab* menggunakan persamaan Atkinson-Boore World Wide Data NGA (2003) :

$$\log Y = f_n(M) + c_3h + c_4h - g \log R + c_5 sl SC + c_6 sl SD + c_7 sl SE \quad (2)$$

Keterangan

$f_n(M)$	= fungsi pengaruh momen Magnitudo
$c_3h, c_4h$	= fungsi pengaruh kedalaman sumber gempa
$g \log R$	= fungsi pengaruh jarak
$SC, SD, SE$	= fungsi pengaruh jenis tanah
$g$	= $10^{(1,2-0,13M)}$ untuk kejadian <i>interface</i>
	= $10^{(0,301-0,01M)}$ untuk kejadian <i>intraslab</i>

6. Memperhitungkan percepatan gerakan tanah maksimum dengan pengaruh berbagai ketidakpastian gempa pada probabilitas terlampaui dalam kala ulang waktu tertentu. PSHA diperhitungkan dengan terori probabilitas (EERI, 1989) dengan persamaan sebagai berikut

$$P_x(X) = \int_M \int_R P(X > x | m, r) f_m(m) f_r(r) dr dm \quad (3)$$

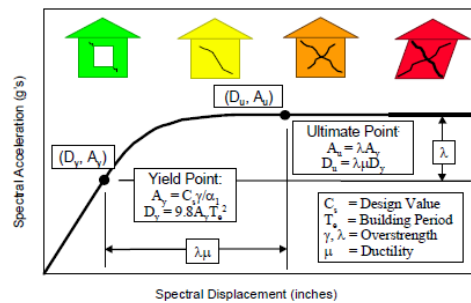
Keterangan

$P(X > x   m, r)$	= Probabilitas akselerasi gerakan tanah ( $X$ ) yang melebihi nilai ( $x$ ) pada lokasi yang ditinjau dengan magnitudo ( $m$ ) dan jarak ( $r$ )
$f_m$	= Fungsi yang dipengaruhi oleh magnitudo gempa
$f_r$	= Fungsi yang dipengaruhi oleh jarak sumber gempa

Periode ulang analisis probabilitistik ditinjau pada probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (kala ulang 2475 tahun) sesuai dengan kebutuhannya yaitu untuk analisis dan evaluasi bangunan gedung (Asrurifak, 2016). Hasil dari PSHA berupa *Uniform Hazard Spectrum* (UHS) yaitu respons spektrum yang memiliki nilai akselerasi gempa pada setiap waktunya sama dengan probabilitas terlampaui pada tingkat hazard tertentu. UHS ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara *spectral acceleration* dan waktu sehingga mampu merepresentasikan kejadian gempa secara deterministik (FERC, 2014). Selanjutnya kurva UHS perlu disederhanakan kedalam bentuk respons spektrum standar untuk lebih memudahkan perhitungan estimasi kerusakan maupun kerugian (Hazus, 2015).

### 2.2.3 Pushover Analysis

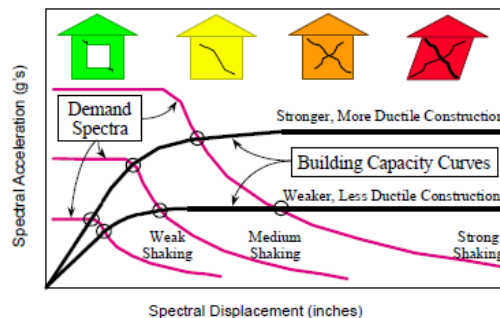
Desain kapasitas perencanaan struktur gedung eksisting beton bertulang mengacu pada SNI 2847:2002, sedangkan perhitungan gempa sesuai dengan SNI 1726:2002. Melalui nonlinear static pushover analysis pada struktur gedung sesuai dengan prosedur FEMA 440 (2005) dapat diketahui pola keruntuhan bangunan yang disebabkan oleh guncangan gempa (Hazus, 2015). Hal tersebut dapat dilihat dari dari kurva kapasitas hasil analisis pushover yang merepresentasikan hubungan antara gaya lateral terhadap kondisi suatu bangunan berdasarkan nilai drift ratio nya (Gambar 3).



Gambar 3 Kurva kapasitas bangunan (Hazus, 2015)

### 2.2.4 Performance Point

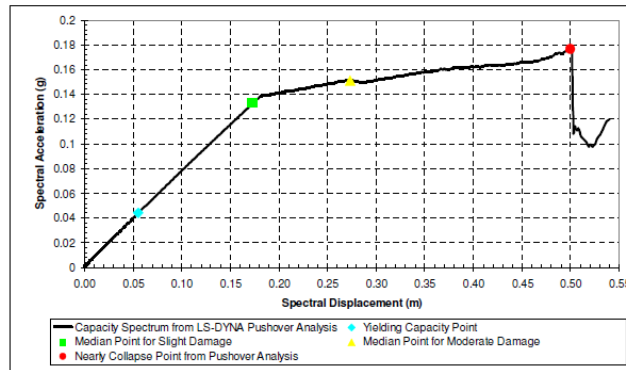
Response bangunan dalam menahan gaya gempa ditentukan oleh pertemuan *spektrum demand* dengan kurva kapasitas bangunan atau disebut *performance point*. Spektrum demand yaitu response spektrum standar redaman 5% hasil penyederhanaan dari *uniform hazard spektra* yang direduksi sesuai dengan redaman efektif bangunan.



Gambar 4 Performance point (Hazus, 2015)

### 2.2.5 Fragility Curve

*Fragility curve* diperlukan dalam prosedur asesmen struktur gedung beton bertulang guna menentukan kemungkinan adanya kegagalan akibat gempa bumi (Porter, 2020). Terdapat beberapa metode dalam pembuatan *fragility curve* yaitu empiris, analitis serta *expert judgement* (Ravikant & Vinay, 2018). Secara analitis *fragility curve* dapat diperoleh melalui analisis struktur yaitu dengan memberikan intensitas beban seismik secara progresif pada pemodelan struktur bangunan serta mengestimasi kondisi kerusakan struktur bangunan pada setiap tahapannya. Duan & Pappin (2008) mengusulkan pembuatan *fragility curve* untuk beberapa kategori kerusakan struktur berdasarkan hasil *non linear pushover analysis*.



Gambar 5 Median *spectral displacement* berdasarkan kurva *pushover* (Duan & Pappin ,2008)

*Fragility curve* bangunan (Gambar 6) diperoleh dari *median spectral displacement* hasil analisis pola keruntuhan bangunan berdasarkan *capacity curve* menggunakan persamaan sebagai berikut

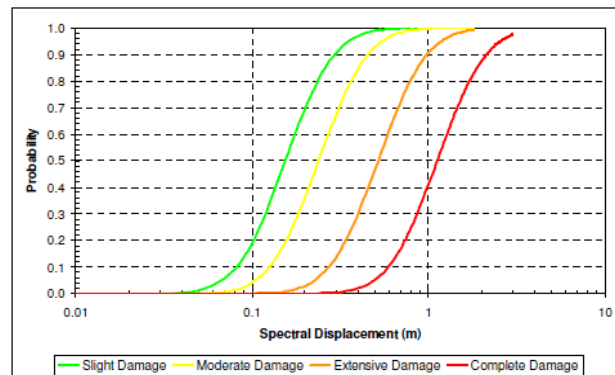
$$p[ds S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \quad (4)$$

Keterangan

$S_{d,ds}$  = Median spectral displacement ambang kategori kerusakan (mm)

$\beta_{ds}$  = Standar deviasi spectral displacemen kategori kerusakan

$\Phi$  = Distribusi Normal standar



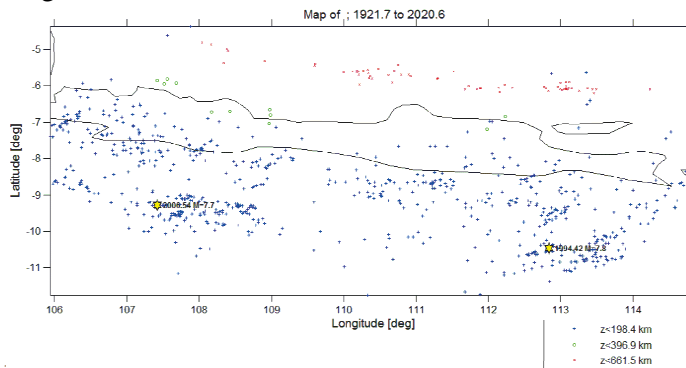
Gambar 6 *Fragility curve* (Duan & Pappin ,2008)

Potensi kerusakan bangunan dapat diperoleh dengan melakukan plotting hasil analisis *performance point* yaitu *Spectral displacement* ( $S_d$ ) dan *Spectral acceleration* ( $S_a$ ) pada *fragility curve* (Munafi et al., 2018).

### 3 Hasil dan Pembahasan

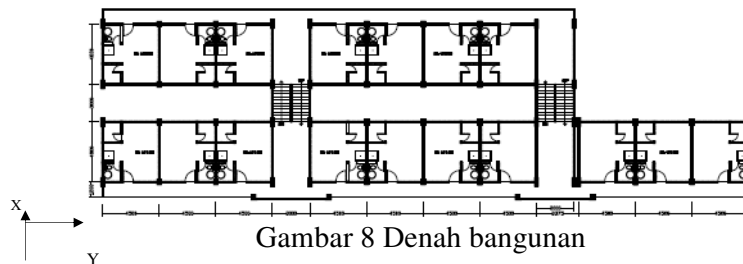
#### 3.1 Pengumpulan Data

Data historis gempa diambil dari rentang waktu tahun 1900 sampai 2020 dengan radius 500 km terhadap koordinat letak gedung objek penelitian yaitu 7,786 °S dan 110,81°E. Dari pengumpulan data diperoleh sebanyak 4060 riwayat gempa dengan magnitude sama dengan atau lebih besar dari 5 Mw yang tersebar sesuai gambar berikut,

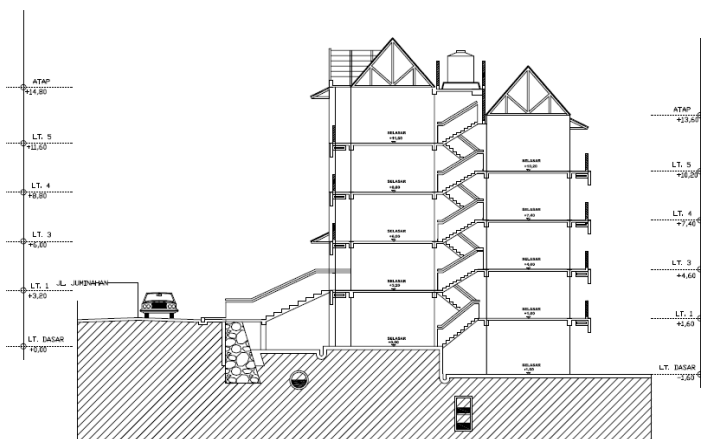


Gambar 7 Sebaran gempa  $\geq 5 Mw$  (USGS, 2020)

Data bangunan gedung objek penelitian berupa *asbuilt drawing* disajikan pada Gambar 8 dan Gambar 9,



Gambar 8 Denah bangunan

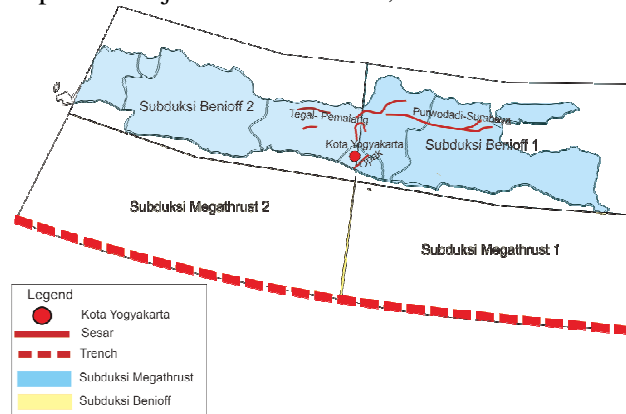


Gambar 9 Potongan melintang bangunan (sumbu x)



### 3.2 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

Analisis probabilistik dimulai dengan melakukan *declustering* terhadap sebaran data gempa. Dari proses *declustering* sesuai dengan model Reasenberg (1985) diperoleh gempa utama sebanyak 3445 data sedangkan sisanya sebanyak 615 merupakan gempa susulan dipisahkan. Proses identifikasi berdasarkan mekanisme setiap data gempa yang terjadi membagi sumber gempa kedalam beberapa kategori seperti ditunjukkan Gambar 10,



Gambar 10 Sumber gempa pulau Jawa

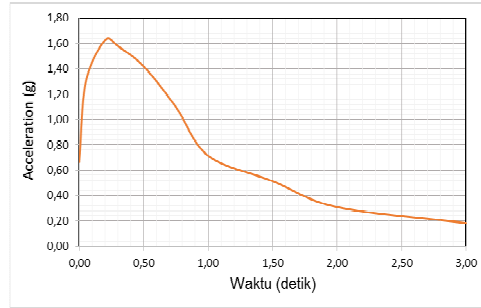
Melalui analisis model *maksimum likelihood* didapatkan karakteristik seismik pada setiap sumber gempa yang ditunjukkan oleh besaran nilai a, b, dan *Magnitude of completeness* ( $M_c$ ) sesuai dengan tabel berikut,

Tabel 1 Karakteristik klaster gempa

No.	Sumber Gempa	Nilai a	Nilai b	$M_c$
1	Subduksi Megathrust 1	8.95	1.5	5.2
2	Subduksi Megathrust 2	11	1.86	5.3
3	Subduksi Benioff 1	9.74	1.81	5.6
4	Subduksi Benioff 2	12.2	2.16	5.4
5	Sesar Opak	7.51	1.46	5.2
6	Sesar Tegal-Pemalang	12.3	2.41	5.2
7	Sesar Purwodadi-Surabaya	31.7	5.7	5.7

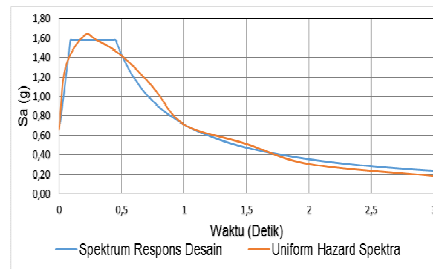
Nilai b menunjukkan besaran magnitude gempa yang kemungkinan terjadi. Semakin kecil angka tersebut menunjukkan bahwa terdapat potensi kegempaan dengan magnitude yang besar pada wilayah tersebut begitupun sebaliknya. Variabel a menunjukkan tingkat aktivitas seismik suatu daerah. Angka a yang besar menunjukkan tingginya tingkat intensitas kejadian gempa dan sebaliknya a yang kecil menunjukkan kejadian gempa yang jarang. Sedangkan nilai  $M_c$  menunjukkan seberapa baik dan lengkap data tersebut diperoleh (Erlangga, 2020).

Objek penelitian merupakan bangunan gedung sehingga analisis *Uniform Hazard Spectra* (UHS) dilakukan pada probabilitas 2% dalam 50 tahun atau periode ulang 2500 tahun (Asrurifak, 2016). Hasil analisis probabilistik dengan persamaan atenuasi *Campbel-bozorgonia NGA (2)* dan *Atkinson-boore world wide data NGA (3)* pada koordinat site gedung diperoleh kurva UHS sebagai berikut,



Gambar 11 Uniform Hazard Spectra (UHS) probabilitas 2% dalam 50 tahun

Nilai *spectral acceleration* ( $S_a$ ) setiap waktu pada kurva UHS mampu mengakomodasi akselerasi gerakan tanah serluruh gempa yang terjadi yang terjadi pada probabilitas kejadian 2% dalam 50 tahun atau dalam kurun waktu 2500 tahun. Sehingga dapat dikatakan bahwa response spektrum tersebut mampu merepresentasikan satu skenario gempa terbesar yang mungkin terjadi pada rentang waktu tersebut. Kemudian untuk mensimplifikasi analisis potensi kerusakan bangunan maka UHS perlu dikonversi ke dalam bentuk response spektrum standar dengan tetap mempertahankan data fundamentalnya baik  $S_a$  dan  $T$ .

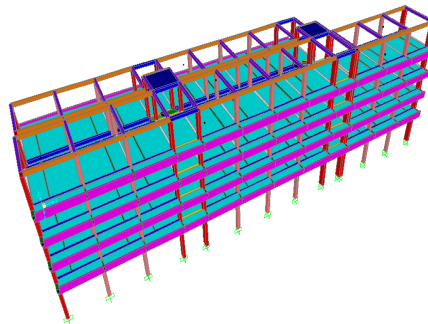


Gambar 12 Standar response spektrum redaman 5%

Berdasarkan idealiasi kurva respon spektrum diperoleh nilai PGA sebesar 0,737g, periode pendek (0,2 detik) 1,580g serta periode 1 detik 0,714g. Variabel tersebut biasanya digunakan untuk mengestimasi kinerja bangunan terhadap gempa besar sehubungan dengan periode getar alami suatu bangunan (United States Geological Survey, 2020).

### 3.3 Pushover Analysis

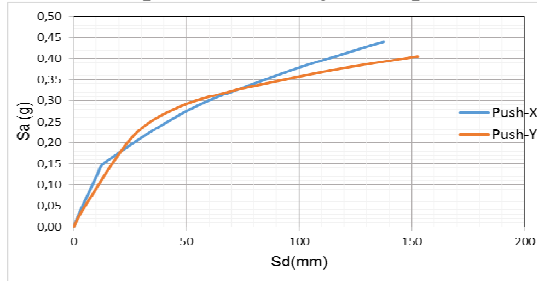
*Nonlinear static pushover analysis* dilakukan dengan memodelkan bangunan sesuai kondisi eksisting menggunakan *software* SAP 2000 (Gambar 13).



Gambar 13 Pemodelan struktur bangunan

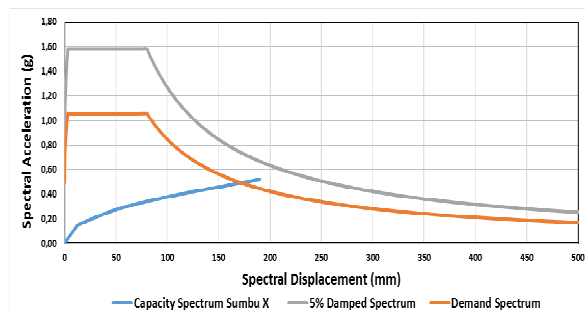
Beban gravitasi dan gempa dalam analisis pushover diberikan mengacu pada peraturan Indonesia SNI-1727-2013(2013) & SNI-1726-2019 (2019).

Kurva kapasitas hasil analisis pushover ditunjukkan pada Gambar 14,



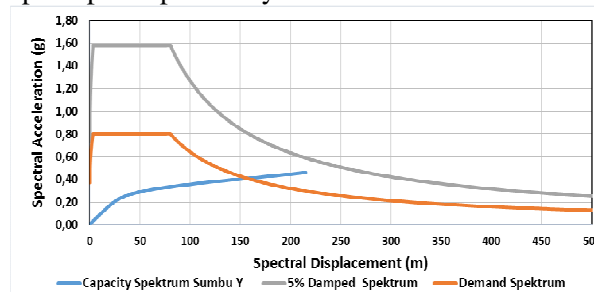
Gambar 14 Kurva kapasitas bangunan

Respon bangunan ketika terjadi gempa terlihat dari perpotongan antara spektrum *demand* dengan kurva kapasitas atau disebut dengan istilah *performance point* (Gambar 15 & 16).



Gamba 15 *Performance point* sumbu x

Pada arah sumbu x atau melintang bangunan, *performance point* terjadi pada nilai *spectral acceleration* ( $S_a$ ) = 0,48 g sedangkan nilai *spectral displacement* ( $S_d$ ) = 170 mm. Hal tersebut berarti bahwa dengan skenario gempa berskala besar yang terjadi searah dengan sumbu x, bangunan berpotensi mengalami *displacement* terbesar 170 mm pada kondisi  $S_a$  sebesar 0,48 g setelah gempa mencapai percepatan puncaknya.

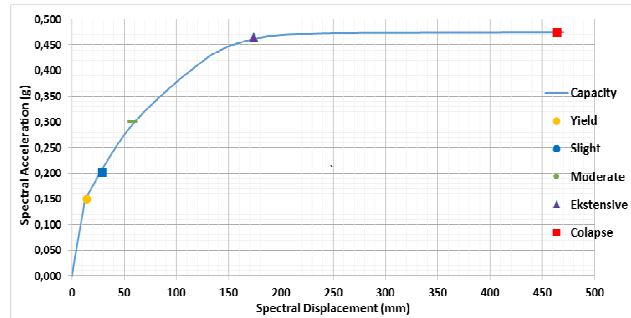


Gambar 16 *Performance point* sumbu y

Pada arah sumbu y atau memanjang, *performance point* terjadi pada nilai *spectral acceleration* ( $S_a$ ) = 0,42 g sedangkan nilai *spectral displacement* ( $S_d$ ) 153 mm Hal tersebut berarti bahwa dengan skenario gempa berskala besar yang

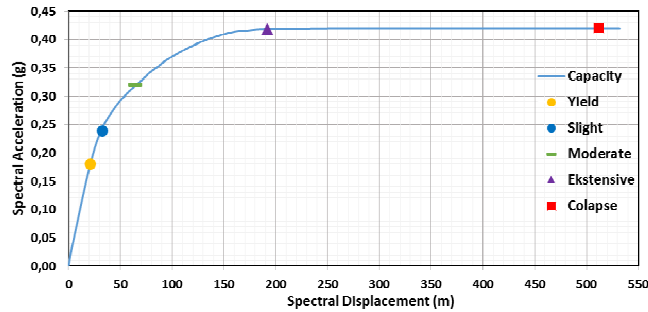
terjadi searah dengan sumbu y, bangunan berpotensi mengalami *displacement* terbesar 153 mm pada kondisi  $S_a$  sebesar 0,42 g setelah gempa mencapai percepatan puncaknya.

Selain itu kurva kapasitas yang menggambarkan kondisi nonlinear struktur bangunan akibat beban lateral gempa juga dapat digunakan untuk mengestimasi nilai median ambang batas kerusakan bangunan yaitu rusak ringan (*slight*), sedang (*moderate*), berat (*ekstensive*) dan hampir runtuh (*nearly colapse*).



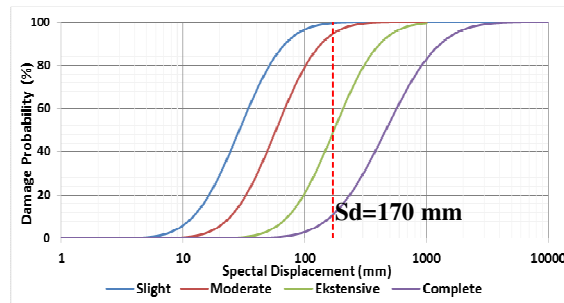
Gambar 17 Median spectral displacement sumbu x

Berdasarkan kurva tersebut titik median struktur bangunan mengalami pelelehan (*yield*) terjadi pada  $S_d = 14$  mm, kerusakan ringan (*slight*) = 29 mm, sedang (*moderate*) = 58 mm, berat (*ekstensive*) = 174 mm sedangkan hampir runtuh (*nearly colapse*) = 464 mm.



Gambar 18 Median spectral displacement sumbu Y

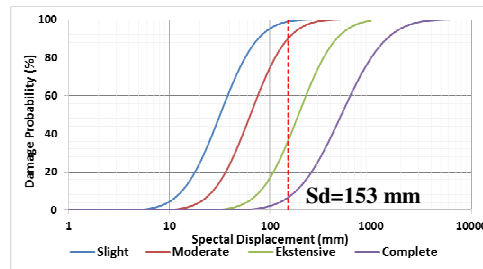
Berdasarkan tersebut titik median struktur mengalami pelelehan (*yield*) terjadi pada  $S_d = 21,33$  mm, kerusakan ringan (*slight*) = 32 mm, sedang (*moderate*) = 64 mm, berat (*ekstensive*) = 192 mm sedangkan hampir runtuh (*nearly colapse*) = 512 mm.



Gambar 19 Fragility curve sumbu x

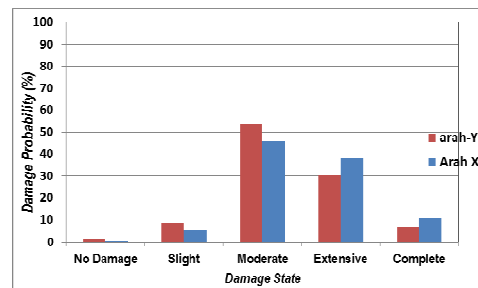
Dari *median spectral displacement* dilakukan analisis probabilitas kerusakan struktur pada setiap tingkatan kategori kerusakan baik kerusakan ringan “*slight*”, sedang “*moderate*”, berat “*ekstensive*” maupun hampir runtuh “*nearly colapse*” dengan persamaan fungsi log normal (4). Hasil dari analisis tersebut berupa *fragility curve* pada setiap tingkat kategori struktur bangunan seperti ditunjukkan pada Gambar 19,

Potensi kerusakan struktur bangunan akibat gempa arah sumbu x diketahui dengan melakukan plotting hasil *performance point* yaitu *spectral displacement*,  $S_d = 170$  mm pada *fragility curve* tersebut. Sedangkan fragility curve sumbu Y bangunan adalah sebagai berikut,



Gambar 20 Fragility curve sumbu Y

Potensi kerusakan struktur bangunan akibat gempa arah sumbu y diketahui dengan melakukan *plotting* hasil *performance point* yaitu *spectral displacement*,  $S_d = 153$  mm pada *fragility curve* tersebut. Secara lebih detail presentase probabilitas kerusakan bangunan baik arah x maupun y berdasarkan hasil plotting tersebut ditunjukkan pada Gambar berikut,



Gambar 21 Potensi kerusakan bangunan

Apabila gempa besar terjadi pada arah sumbu x probabilitas bangunan tidak mengalami kerusakan sama sekali 0,465%, kerusakan ringan “*slight*” 4,959%, sedang “*moderate*” 45,940%, berat “*ekstensive*” 37,880% dan hampir runtuh “*nearly colapse*” yaitu 10,756%. Sedangkan apabila gempa besar terjadi pada arah sumbu y potensi tidak terjadi kerusakan sama sekali pada sumbu y yaitu 0,465%, kerusakan ringan “*slight*” 4,959%, sedang “*moderate*” 45,940%, berat “*ekstensive*” 37,880% dan hampir runtuh “*nearly colapse*” yaitu 10,756%. Potensi kerusakan baik pada arah x maupun y bangunan akibat gempa besar didominasi oleh kerusakan sedang “*moderate*” mengindikasikan bahwa banyak struktur balok dan kolom beton bertulang mengalami retak rambut. Beberapa elemen struktur sudah mencapai kondisi leleh. Struktur yang daktail mengalami

retak lentur serta sebagian kulit beton terkelupas sedangkan *frame* yang kurang begitu daktail mengalami retak geser dan terkelupasnya kulit beton (Hazu, 2015).

## 4 Kesimpulan dan Saran

### 4.2 Kesimpulan

Analisis kegempaan dengan skenario gempa lebih besar dari 5 magnitudo secara probabilistik menghasilkan respon spektrum dengan PGA 0,737g, periode pendek (0,2 detik) 1,580g serta periode 1 detik 0,714g. Pertemuan antara *spektrum demand* dengan *capacity speckrum* atau disebut sebagai *performance point* terjadi pada *spectral displacement* arah x sebesar 170 mm sedangkan arah y 153 mm. Berdasarkan hasil analisis kerentanan diperoleh apabila gempa besar terjadi pada arah sumbu x probabilitas bangunan tidak mengalami kerusakan sama sekali sebesar 0,465%, kerusakan ringan “*slight*” 4,959%, sedang “*moderate*” 45,940%, berat “*ekstensive*” 37,880% dan hampir runtuh “*nearly colapse*” yaitu 10,756%. Sedangkan apabila gempa besar terjadi pada arah sumbu y potensi tidak terjadi kerusakan sama sekali yaitu 0,465%, kerusakan ringan “*slight*” 4,959%, sedang “*moderate*” 45,940%, berat “*ekstensive*” 37,880% dan hampir runtuh “*nearly colapse*” yaitu 10,756%. Potensi kerusakan baik pada arah x maupun y bangunan akibat gempa besar didominasi oleh kerusakan sedang “*moderate*”.

### 1.1 Saran

Secara umum bangunan sudah didesain dengan baik sehingga pada skenario gempa besar dengan periode ulang 2500 tahun diprediksi hanya didominasi oleh kerusakan sedang “*moderate*”. Sedangkan potensi bangunan mendekati keruntuhan “*nearly colapse*” hanya berada di kisaran 10 persen saja. Namun apabila dikehendaki kerusakan didominasi oleh rusak ringan “*slight*” maka bisa dilakukan *retrofitting* struktur bangunan yaitu dengan memperkuat elemen struktur beton bertulang untuk meningkatkan ketahanan bangunan terhadap gempa salah satunya dengan cara *jacketing* balok, kolom maupun sambungan balok-kolom (GNNRA, 2017).

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jendral Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah membiayai penelitian ini.

## Daftar Kepustakaan

- Asrurifak, M. (2016). *Peta Gempa Indonesia (SNI 1726-2012) dan Spektrum Response Disain untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa dalam Aspek Geoteknik*. Jakarta: Workshop Continuing Professional Development (CPD) Ahli.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *SNI 2847:2013: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN Press.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *SNI 1726-2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung (Issue 8)*. Jakarta: BSN Press.

- BAPPENAS. (2006). *Penilaian Awal Kerusakan dan Kerugian Bencana Alam di Yogyakarta dan Jawa Tengah*. Jakarta: BAPPENAS.
- Duan, X., & Pappin, J. W. (2008). A Procedure For Establishing Fragility Functions For Seismic Loss Estimate Of Existing Buildings Based On Nonlinear Pushover Analysis. *14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Erlangga, W. (2020). Karakteristik Dan Parameter Subduksi Sumber Gempa Pulau Jawa. *Teknisia*, XXV(2), 30–40. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol25.iss2.art4>
- FEMA. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. *Applied Technology Council (ATC-55 Project) 201 Redwood Shores Parkway, Suite 240 Redwood City, California 94065, June*, 392.
- FERC. (2014). *Engineering Guidelines Risk-Informed Decision Making-Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. Washington D.C.
- GNNRA. (2017). Government of Nepal National Reconstruction Authority: REPAIR AND RETROFITTING For RCC STRUCTURE. *Kathmandu, Nepal*: National Reconstruction Authority.
- Hazus, M. (2015). Earthquake Loss Estimation Methodology. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency Mitigation Division. In *Federal Emergency Management Agency*. Washington, D.C.
- Irsyam, M. et al. (2010). *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*. Bandung: Tim Revisi Gempa Indonesia.
- Makrup, L. (2013). *Seismic Hazard untuk Indonesia*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Munafi, Y., Faraodi, R., & Asroni, A. (2018). Damage and loss probability assessment of reinforced concrete building due to Yogyakarta earthquake scenario using pushover and hazus analysis (case study: Student center building, faculty of social science, UNY). *MATEC Web of Conferences*, 229. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822902014>
- Porter, K. (2020). A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. *University of Colorado Boulder*, 138 pp. <https://www.sparisk.com/pubs/Porter-beginners-guide.pdf>
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Umum dan Perumahan Rakyat.
- Ravikant, S., & Vinay, K. S. (2018). Fragility Curves for Reinforced Concrete Structural Walls. *I-Manager's Journal on Structural Engineering*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.26634/jste.7.2.14039>
- Saputra, E., Makrup, L., Nugraheni, F., & Pawirodikromo, W. (2020). Analisis Percepatan Tanah Permukaan Di Wilayah Riau Dengan Metode Psha. *Teknisia*, XXV(1), 42–49. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol25.iss1.art5>
- United States Geological Survey. (2020). *Earthquake Hazards 201 - Technical Q&A*. [https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/earthquake-hazards-201-technical-qa?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/earthquake-hazards-201-technical-qa?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)