

ANALISIS KERAPUHAN SEISMIK STRUKTUR BETON BERTULANG

Richard Frans^{1*}, Hendry Tanoto Kalangi², Hannah Abbey Goretti³

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar

^{1,2}Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar
^{1,2}Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar
Jl. Tanjung Alang No.23, Kota Makassar, Sulawesi Selatan

*E-mail: richardfrans.rf@gmail.com

Abstrak

Letak geologis Indonesia, yang berada di daerah yang rawan terhadap risiko gempa, menyebabkan perlunya dilakukan analisis terhadap kerentanan bangunan, khususnya gedung bertingkat, terhadap pengaruh gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui probabilitas suatu struktur gedung mengalami tingkat kerusakan tertentu akibat gerakan tanah saat terjadi gempa. Analisis kerapuhan seismik dilakukan pada suatu struktur beton bertulang, yaitu Gedung ABC, dengan menggunakan analisis *pushover* dan metodologi HAZUS. Analisis *pushover* dilakukan dengan bantuan program *ETABS v16.0.2*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa probabilitas terjadinya kegagalan struktur untuk setiap kondisi batas bervariasi, tergantung pada perpindahan spektral yang terjadi saat bangunan mengalami gempa. Berdasarkan kurva kerapuhan seismik, probabilitas terjadinya kegagalan struktur jika bangunan mengalami perpindahan spektral maksimum, untuk kondisi *slight damage*, *moderate damage*, *extensive damage* dan *complete damage* masing-masing sebesar 99,93%, 99,46%, 92,16% dan 50% pada arah x, serta sebesar 99,19%, 96,28%, 86,34% dan 50% pada arah y.

Kata kunci: Kerapuhan seismik, Kurva kerapuhan, Analisis *pushover*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perencanaan suatu bangunan bertingkat yang baik, harus memperhatikan tingkat ketahanan bangunan terhadap pengaruh beban vertikal dan horizontal, khususnya pengaruh gempa, untuk mencegah terjadinya keruntuhan pada bangunan. Letak geologis Indonesia, yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik, menyebabkan Indonesia memiliki risiko gempa yang cukup tinggi. Hal ini menimbulkan kekhawatiran terhadap ketahanan bangunan, terutama fasilitas publik dan bangunan penting, apabila terjadi gempa bumi. Potensi kerusakan bangunan yang timbul akibat gempa dapat membahayakan keselamatan pengguna dan lingkungan sekitarnya, maka upaya mitigasi perlu dilakukan untuk meminimalisasi dampak yang timbul akibat bencana gempa.

Salah satu upaya yang berguna untuk mengurangi kerugian akibat gempa yaitu, dengan memperkirakan probabilitas tingkat kerusakan dan kerugian yang timbul pada bangunan akibat bencana gempa. Nilai probabilitas yang diperoleh dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan, apakah bangunan sudah cukup tahan terhadap gempa atau perlu dilakukan peningkatan kekuatan.

Probabilitas terjadinya kegagalan struktur dinyatakan dalam kurva kerapuhan seismik. Salah satu prosedur yang dapat digunakan untuk memperoleh kurva kerapuhan seismik adalah prosedur yang terdapat dalam metodologi HAZUS.

Metodologi HAZUS merupakan salah satu metodologi yang sering digunakan untuk memperkirakan tingkat kerusakan struktur bangunan yang disebabkan oleh guncangan akibat gempa di wilayah Amerika Serikat. Bagian terpenting dalam melakukan estimasi kerugian akibat gempa dengan metodologi HAZUS adalah menggambarkan kurva kerapuhan seismik untuk setiap kondisi batas struktur. Kondisi batas struktur (*damage state*) ini meliputi kondisi kerusakan ringan (*slight damage*), rusak sedang (*moderate damage*), rusak berat (*extensive damage*) dan roboh atau hancur (*complete damage*).

Metodologi HAZUS menggunakan kurva kapasitas untuk membentuk kurva kerapuhan, sehingga diperlukan analisis struktur pada bangunan untuk memperoleh kurva kapasitas. Analisis *pushover* merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan kurva kapasitas. Analisis *pushover* merupakan suatu analisis statik nonlinier di mana gaya gempa rencana diasumsikan sebagai beban lateral statik pada pusat massa tiap lantai, yang nilainya

ditingkatkan secara berangsur-angsur hingga menyebabkan terjadinya pelepasan pertama pada struktur, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengakibatkan perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai kondisi plastik (Pranata, 2006). Kurva kapasitas hasil analisis *pushover* selanjutnya digunakan untuk menggambarkan kurva kerapuhan seismik.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

- Bagaimana kurva kapasitas dan spektrum kapasitas struktur gedung berdasarkan hasil dari analisis *pushover*?
- Bagaimana hasil kurva kerapuhan seismik struktur gedung pada berbagai kondisi batas struktur?
- Bagaimana probabilitas terjadinya kegagalan struktur berdasarkan kurva kerapuhan seismik pada berbagai kondisi batas struktur?

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

- Memperoleh kurva kapasitas dan spektrum kapasitas struktur gedung dengan metode analisis *pushover*.
- Mendapatkan kurva kerapuhan seismik struktur gedung pada berbagai kondisi batas struktur.
- Mengetahui probabilitas terjadinya kegagalan pada struktur gedung pada berbagai kondisi batas struktur.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Bangunan yang akan diteliti yaitu Gedung ABC, yang merupakan salah satu Gedung yang terletak di Kelurahan Jongaya, Kecamatan Tamalate, Kota Makassar, Sulawesi Selatan.

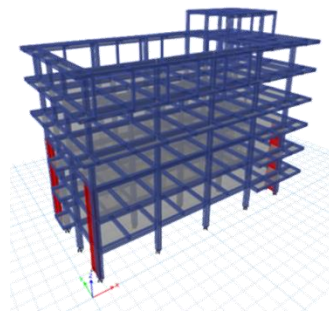
Data dan Pemodelan Struktur

Data yang diperlukan untuk melakukan analisis terdiri atas data struktur, jenis tanah, serta mutu bahan yang digunakan pada bangunan Gedung ABC.

Gedung ABC terdiri atas 7 tingkat dengan tinggi total bangunan 28 meter, serta memiliki lebar 34 meter dan panjang 17 meter. Luas

bangunan sebesar $\pm 3478\text{m}^2$. Bangunan yang ditinjau menggunakan material beton bertulang, yang terdiri atas beton dengan kuat tekan 25MPa dan baja tulangan dengan kuat tarik 240MPa dan 400MPa.

Struktur gedung dimodelkan secara tiga dimensi sesuai dengan data bangunan yang diperoleh menggunakan program *ETABS v16.0.2*. Komponen nonstruktural bangunan tidak dimodelkan dalam pemodelan 3D. Hasil pemodelan struktur gedung, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan 3D Struktur Gedung

Pembebanan struktur

Beban-beban yang bekerja pada struktur terdiri atas beban mati, beban hidup dan beban gempa. Perhitungan beban mati dan beban hidup mengacu pada Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG 1987) dan Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2013). Beban gempa ditentukan berdasarkan Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Nongedung (SNI 1726:2019). Pembebanan gempa dilakukan dengan memasukkan kurva respons spektrum sesuai dengan lokasi yang ditinjau beserta parameter yang dibutuhkan, ke dalam program *ETABS*.

Analisis *Pushover*

Analisis *pushover* dilakukan dengan menggunakan program *ETABS v16.0.2*. Pembebanan dalam analisis *pushover* terdiri atas 2 tahap, yaitu pemberian beban gravitasi (beban mati dan beban hidup), dan dilanjutkan dengan pemberian beban lateral yang ditingkatkan secara berangsur-angsur hingga mencapai target perpindahan tertentu.

Analisis *pushover* menghasilkan kurva kapasitas, yang menunjukkan hubungan antara perpindahan dan gaya geser dasar. Kurva kapasitas ini kemudian dikonversi menjadi spektrum kapasitas, yang menunjukkan

hubungan antara perpindahan spektral atau *spectral displacement* (S_d) dan percepatan spektral atau *spectral acceleration* (S_a).

Analisis Kerapuhan Seismik

Analisis kerapuhan seismik digunakan untuk memperoleh probabilitas terjadinya kegagalan pada setiap kondisi batas struktur. Probabilitas terjadinya kegagalan struktur dinyatakan dalam kurva kerapuhan seismik. Probabilitas terjadinya kegagalan pada suatu kondisi batas (*damage state*) ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$P(ds|S_d) = \phi\left(\frac{1}{\beta_{ds}}\right) \ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right) \quad (1)$$

Keterangan:

- $P(ds|S_d)$ = probabilitas terjadinya kerusakan.
- S_d = perpindahan spektral (m).
- $\bar{S}_{d,ds}$ = nilai median *spectral displacement* saat bangunan mencapai ambang batas (*damage state*), ds .
- β_{ds} = standar deviasi dari logaritma natural pada *spectral displacement* dari suatu *damage state*, ds .
- ϕ = fungsi distribusi standar kumulatif normal.

Nilai median untuk setiap kondisi batas struktur diperoleh menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Barbat *et al.* (2008), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai standar deviasi pada setiap kondisi batas ditentukan berdasarkan peraturan HAZUS.

Tabel 1. Median untuk setiap *damage state*

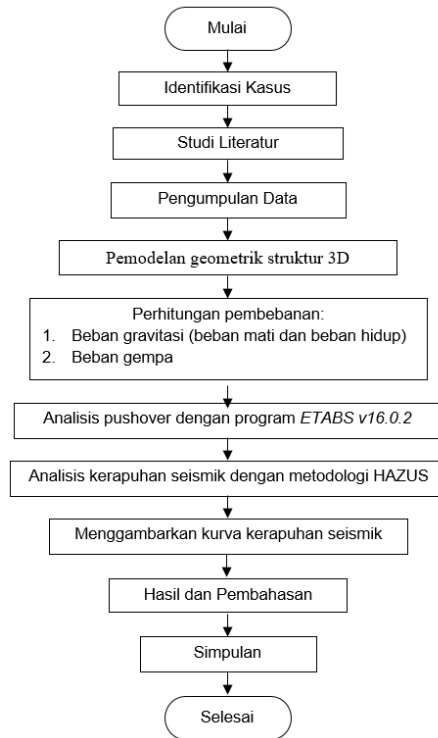
Damage State	Median
<i>Slight</i>	$\bar{S}_d = 0,7D_y$
<i>Moderate</i>	$\bar{S}_d = D_y$
<i>Extensive</i>	$\bar{S}_d = D_y + 0,25(D_u - D_y)$
<i>Complete</i>	$\bar{S}_d = D_u$

Sumber: Barbat *et al.*, 2008

Tiap variabel acak perpindahan spektral disimulasikan hingga diperoleh nilai probabilitas untuk tiap kondisi batas struktur. Nilai probabilitas digunakan sebagai ordinat (y) dan nilai perpindahan spektral sebagai absis (x), yang dihubungkan untuk membentuk kurva kerapuhan seismik.

Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian menunjukkan alur dari penelitian yang dilaksanakan, seperti yang ditunjukkan dalam skema berikut.



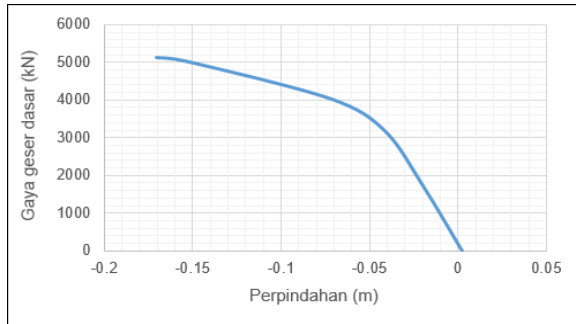
Gambar 2. Bagan alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

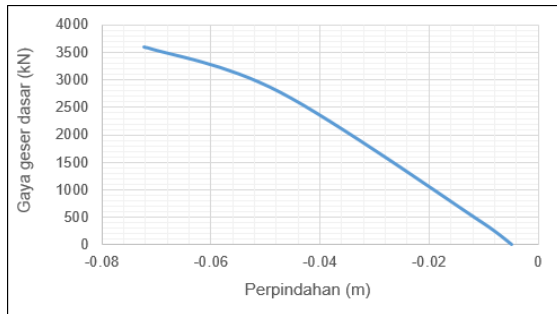
Hasil Analisis Pushover

Analisis *pushover* merupakan suatu metode analisis dengan memberikan pola beban statik tertentu pada struktur dalam arah lateral, yang nilainya ditingkatkan secara bertahap hingga struktur mencapai target perpindahan atau beban tertentu. Hasil dari analisis *pushover* adalah kurva kapasitas.

Kurva kapasitas merupakan kurva yang menggambarkan hubungan antara besarnya perpindahan dan gaya geser dasar. Kurva kapasitas diperoleh dengan mendorong struktur secara bertahap dengan cara memberikan suatu pola beban lateral pada struktur sampai mencapai kondisi ultimitnya dan melihat hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan yang terjadi akibat pembebanan tersebut. Kurva kapasitas diperoleh dari program *ETABS* setelah analisis *pushover* selesai dilakukan. Bentuk kurva kapasitas hasil analisis *pushover* pada arah x dan arah y dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



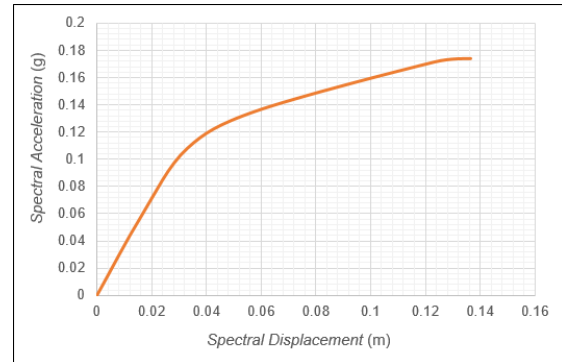
Gambar 3. Kurva kapasitas arah x



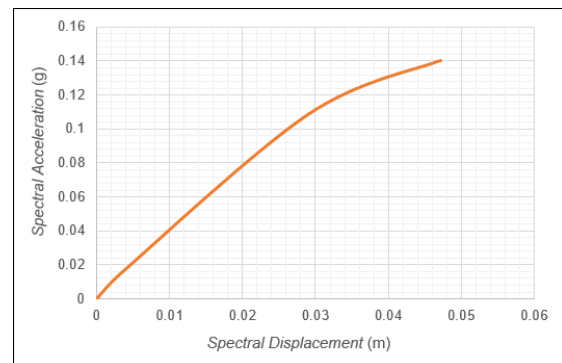
Gambar 4. Kurva kapasitas arah y

Kurva kapasitas arah x dan arah y menunjukkan peningkatan nilai perpindahan (*displacement*) seiring dengan bertambahnya nilai gaya geser dasar (*base shear*). Kurva kapasitas hasil *pushover* pada arah x mencapai titik maksimum saat gaya geser dasar sebesar 5116,8198kN dan perpindahan mencapai 0,1704m, sedangkan pada arah y terjadi perpindahan maksimum sebesar 0,0724m saat gaya geser dasar mencapai 3594,7831kN. Hasil analisis tidak mencapai titik kontrol perpindahan yang ditentukan, yaitu 1120mm, karena kapasitas deformasi pada tiap elemen struktur telah terlampaui.

Kurva kapasitas yang diperlukan dalam analisis kerapuhan menurut metodologi HAZUS adalah kurva hubungan antara percepatan spektral (S_a) dan perpindahan spektral (S_d) atau yang biasa disebut spektrum kapasitas. Oleh karena itu, perlu dilakukan konversi dari kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas. Konversi kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas dapat dilakukan dengan bantuan program *ETABS*. Kurva spektrum kapasitas struktur gedung pada arah x dan arah y dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Spektrum kapasitas arah x



Gambar 6. Spektrum kapasitas arah y

Spektrum kapasitas arah x dan arah y pada Gambar 29 dan Gambar 30, menunjukkan peningkatan nilai perpindahan spektral (*spectral displacement*) seiring dengan bertambahnya nilai percepatan spektral (*spectral acceleration*). Spektrum kapasitas pada arah x mencapai nilai maksimum saat *spectral displacement* mencapai 0,1366m dan *spectral acceleration* mencapai nilai 0,1742g, sedangkan pada arah y mencapai nilai maksimum saat *spectral displacement* mencapai 0,0472m dan *spectral acceleration* sebesar 0,1403g.

Analisis Kerapuhan Seismik

Kurva kerapuhan seismik merupakan kurva yang menunjukkan hubungan antara nilai perpindahan spektral dan probabilitas kegagalan struktur. Beberapa parameter dibutuhkan untuk menghitung nilai probabilitas kegagalan struktur, antara lain nilai median perpindahan spektral dan standar deviasi pada masing-masing kondisi batas struktur (*damage state*). Penentuan parameter tersebut diuraikan sebagai berikut:

1. Median *spectral displacement point*

Median *spectral displacement point* merupakan sebuah titik pada *spectral*

displacement yang memiliki probabilitas 50% untuk masing-masing *damage state*. Median *spectral displacement point* perlu ditentukan sebagai salah satu dasar dalam pembentukan kurva kerapuhan.

Penentuan nilai median diawali dengan mencari nilai perpindahan luluh (D_y) dan perpindahan ultimit (D_u). Titik luluh merupakan titik di mana sejumlah komponen telah mengalami keluluhan dan struktur mengalami peralihan dari keadaan elastis ke keadaan plastis. Titik ultimit merupakan titik yang menunjukkan kapasitas maksimum bangunan dalam keadaan plastis. Nilai perpindahan luluh dan perpindahan ultimit diperoleh dari spektrum kapasitas. Setelah nilai D_y dan D_u diperoleh, nilai median *spectral displacement* dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan yang diusulkan oleh Barbat *et al.* (2008). Hasil perhitungan nilai median *spectral displacement* untuk setiap *damage state* dirangkum dalam Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Nilai median *spectral displacement*

Damage State	Median (m)	
	Arah x	Arah y
Slight	0,0182	0,0104
Moderate	0,0260	0,0148
Extensive	0,0536	0,0229
Complete	0,1366	0,0472

2. Standar Deviasi

Nilai standar deviasi ditentukan berdasarkan ketentuan dalam HAZUS, yang diklasifikasikan berdasarkan sejumlah kriteria tertentu. Gedung ABC termasuk dalam *essential facilities*.

Seismic design level ditentukan berdasarkan peraturan perencanaan yang digunakan dalam mendesain bangunan. Penentuan *design seismic level* untuk bangunan di Indonesia, jika menyesuaikan dengan klasifikasi *design seismic level* dalam HAZUS, bangunan yang didesain menggunakan SNI 2847:2013 dan seterusnya masuk dalam kategori *high code* (Muntafi dkk, 2018). Perencanaan bangunan Gedung ABC, menggunakan SNI 2847:2013, maka *seismic design level* bangunan termasuk dalam kategori *high code*.

Gedung ABC menggunakan struktur beton bertulang, maka berdasarkan sistem struktur dan materialnya termasuk dalam tipe *Concrete Moment Frame*. Bangunan ini terdiri atas 7 lantai sehingga tergolong dalam bangunan dengan jumlah lantai sedang (*mid-rise*). Berdasarkan kategori bangunan tersebut, Gedung ABC masuk dalam tipe C1M.

Setelah mendapatkan kriteria bangunan sesuai dengan ketentuan yang ada, nilai standar deviasi, β_{ds} , pada setiap *damage state* dapat diperoleh dari tabel HAZUS. Rangkuman nilai standar deviasi dan median *spectral displacement* pada setiap *damage state* dapat dilihat pada Tabel 3.

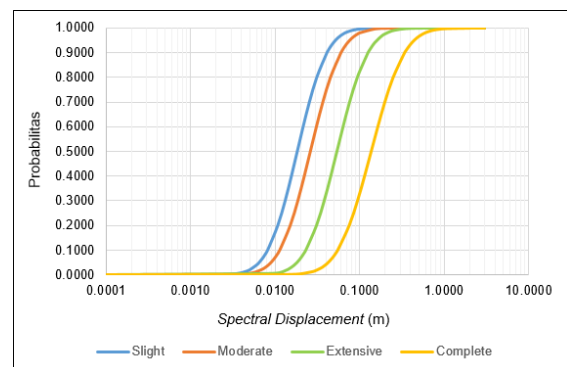
Tabel 3. Nilai \bar{S}_d dan β_{ds} pada berbagai *damage state*

Damage State	\bar{S}_d (m)		β_{ds}	
	Arah x	Arah y	Arah x	Arah y
Slight	0,0182	0,0104	0,63	0,63
Moderate	0,0260	0,0148	0,65	0,65
Extensive	0,0536	0,0229	0,66	0,66
Complete	0,1366	0,0472	0,71	0,71

3. Kurva Kerapuhan Seismik

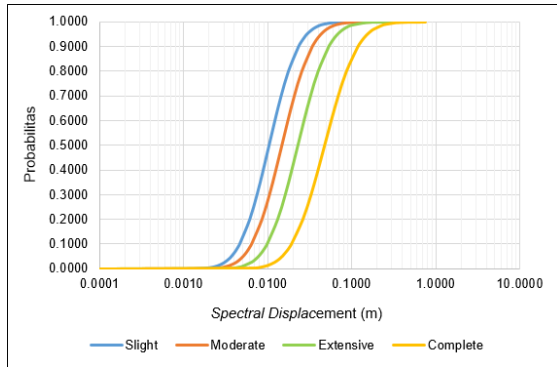
Setelah memperoleh nilai median *spectral displacement* (\bar{S}_d) dan standar deviasi (β_{ds}) untuk setiap *damage state*, probabilitas kegagalan struktur dihitung menggunakan persamaan (1).

Nilai parameter *spectral displacement* (S_d) divariasikan secara acak untuk memperoleh nilai probabilitas dari 0 sampai 1 sehingga dapat dihasilkan bentuk kurva yang baik. Hasil perhitungan probabilitas pada berbagai *damage state* diplotkan ke dalam grafik sehingga diperoleh kurva kerapuhan seismik pada arah x dan arah y, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Kurva kerapuhan seismik arah x

Kurva kerapuhan seismik arah x dan y memperlihatkan probabilitas kegagalan struktur pada berbagai kondisi batas struktur (*damage state*), di mana probabilitas kegagalan struktur ini bergantung pada perpindahan spektral yang terjadi pada struktur saat mengalami beban gempa. Berdasarkan kurva kerapuhan seismik pada Gambar 7 dan Gambar 8, dapat diketahui probabilitas kegagalan struktur Gedung ABC.



Gambar 8. Kurva kerapuhan seismik arah y

Spektrum kapasitas menunjukkan bahwa perpindahan spektral (S_d) maksimum yang terjadi pada arah x dan arah y masing-masing sebesar 0,1366m dan 0,0472m. Apabila bangunan mengalami perpindahan spektral maksimum, probabilitas terjadinya kegagalan pada struktur gedung pada arah x yaitu sebesar 99,93% untuk kondisi kerusakan ringan (*slight damage*), 99,46% untuk kondisi kerusakan sedang (*moderate damage*), 92,16% untuk kondisi kerusakan berat (*extensive damage*) dan 50% untuk kondisi kerusakan *complete*, sedangkan pada arah y yaitu sebesar 99,19% untuk kondisi kerusakan ringan (*slight damage*), 96,28% untuk kondisi kerusakan sedang (*moderate damage*), 86,34% untuk kondisi kerusakan berat (*extensive damage*) dan 50% untuk kondisi kerusakan *complete*. Kondisi kerusakan (*damage state*) yang dapat dijadikan acuan dalam upaya meminimalisasi dampak yang terjadi apabila bangunan mengalami gempa yaitu, kondisi kerusakan yang lebih parah dan memiliki probabilitas lebih besar dari 50%.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis kerapuhan seismik yang telah dilakukan pada struktur Gedung ABC dapat ditarik sejumlah simpulan, yaitu sebagai berikut:

- Kurva kapasitas struktur gedung hasil analisis *pushover* menunjukkan titik runtuh tercapai saat terjadi perpindahan sebesar 0,1704m pada arah x dan 0,0724m pada arah y, dengan gaya geser dasar masing-masing sebesar

5116,8198kN dan 3594,7831kN. Pada kurva spektrum kapasitas, titik runtuh tercapai ketika terjadi perpindahan spektral sebesar 0,1366m pada arah x dan sebesar 0,0472m pada arah y, dengan percepatan spektral masing-masing sebesar 0,1742g dan 0,1403g.

- Kurva kerapuhan seismik Gedung ABC menunjukkan bahwa gedung lebih rentan mengalami kegagalan apabila diberikan beban lateral pada arah y, karena probabilitas terjadinya kegagalan struktur pada arah y untuk setiap *damage state* lebih besar dibandingkan probabilitas kegagalan struktur pada arah x saat terjadi perpindahan spektral dengan nilai yang sama.
- Probabilitas terjadinya kegagalan struktur untuk setiap kondisi batas bervariasi, tergantung pada perpindahan spektral yang terjadi saat bangunan mengalami gempa. Berdasarkan kurva kerapuhan seismik, probabilitas terjadinya kegagalan struktur jika bangunan mengalami perpindahan spektral maksimum, untuk kondisi *slight damage*, *moderate damage*, *extensive damage* dan *complete damage* masing-masing sebesar 99,93%, 99,46%, 92,16% dan 50% pada arah x dan sebesar 99,19%, 96,28%, 86,34% dan 50% pada arah y.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, untuk pengembangan ilmu selanjutnya terdapat beberapa saran, yaitu:

- Penggunaan berbagai metode analisis kerapuhan seismik diperlukan untuk mengetahui metode mana yang lebih cocok digunakan dalam pembentukan kurva kerapuhan untuk wilayah Indonesia.
- Penelitian serupa perlu dilakukan pada bangunan lain di berbagai wilayah di Indonesia, sebagai salah satu upaya evaluasi kinerja struktur bangunan dan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang akan terjadi akibat beragam intensitas gempa.

DAFTAR PUSTAKA

Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*,

- Volume 1, ATC-40. California: California Seismic Safety Commission.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain*, SNI 1727:2013. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*, SNI 1726:2019. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Barbat, A.H., Pujades, L. G. dan Lantada, N. (2008). Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10-11), 851-865. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.006>
- CSI America. (2014). *ETABS Training Manuals*. Retrieved from <http://www.wiki.csiamerica.com/display/doc/ETABS+Training+manuals>
- Departemen Pekerjaan Umum. (1987). *Pedoman perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung*, SKBI-1.3.53.1987. Jakarta: Yayasan Badan Penerbit P.U.
- Duan, X. dan Pappin, J.W. (2008). *A procedure for establishing fragility functions for seismic loss estimate of existing buildings based on nonlinear pushover analysis*. Makalah disajikan dalam The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing 12-17 Oktober 2008. Retrieved from http://www.xiaonianduan.com/media/14WCEE_09-01-0030.PDF
- Muntafi, Y., Faraodi, R. dan 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)*. Makalah disajikan dalam International Conference on Disaster Management (ICDM), Universitas Andalas Padang, Padang 2-4 Mei 2018.
- Pranata, Y.A. (2006). Evaluasi kinerja gedung beton bertulang tahan gempa dengan pushover analysis (Sesuai ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440). *Jurnal Teknik Sipil*. 3 (1), 41-52.
- Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman. (2019). *Desain Spektra Indonesia*. Retrieved from <http://rsapuskim2019.litbang.pu.go.id/>
- Rifki, M. (2019). *Evaluasi kerapuhan seismik pada struktur Gedung Kuliah Twin Building UMY menurut SNI 1726-2012*. (Skripsi). Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Saputra, A. A. (2019). *Evaluasi kinerja dan probabilitas kerusakan seismik gedung laboratorium dengan analisis pushover dan metode HAZUS* (Skripsi). Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Sunggono. 1995. *Buku Teknik Sipil*. Bandung: Nova.
- Wijayanti, E. 2015. *Analisis kerapuhan seismik struktur beton bertulang (Studi kasus: Gedung V Fakultas Teknik UNS Surakarta)* (Skripsi). Surakarta: Universitas Sebelas Maret Surakarta.