

## ANALISIS FUNGSI KERAPUHAN STRUKTUR DENGAN MENGGUNAKAN ANALISIS RIWAYAT WAKTU

Richard Frans<sup>1\*</sup>, Yoyong Arfiadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar, Jalan Tanjung Alang No.23

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jalan Babarsari No.44

\*E-mail: [richardfrans.rf@gmail.com](mailto:richardfrans.rf@gmail.com)

### ABSTRAK

Secara geologis, Indonesia berada di antara tiga lempeng besar dunia, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik yang mengakibatkan Indonesia termasuk negara yang rawan akan gempa sehingga menjadi penting untuk menganalisis kerentanan suatu struktur. Salah satu metode untuk menganalisis kerentanan dari suatu struktur adalah dengan membuat kurva kerapuhan dari struktur tersebut. Kurva kerapuhan ini merepresentasikan tingkat kerentanan bangunan tersebut terhadap beban yang ditinjau, yang dalam hal ini adalah beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk membuat kurva kerapuhan dari struktur gedung yang berada pada kota Makassar. Metode yang digunakan adalah analisis riwayat waktu, akan tetapi sebelum melakukan analisis riwayat waktu, perlu ada penyesuaian respons spektrum yang berada pada kota Makassar dengan rekaman gempa yang digunakan. Untuk itu, teknik time domain digunakan untuk menyesuaikan rekaman gempa dengan grafik respons spektrum kota Makassar. Struktur gedung yang ditinjau memiliki sistem struktur yang berbeda untuk arah-x dan arah-y. Oleh karena itu, kurva kerapuhan yang didapatkan juga akan berbeda untuk arah-x dan arah-y. Kriteria damage state yang digunakan didasarkan pada ATC-40. Berdasarkan hasil yang didapatkan, kemungkinan struktur untuk mengalami damage state immediate occupancy adalah sebesar 4,02% untuk arah-x dan 79,22% untuk arah-y dengan mempertimbangkan percepatan tanah maksimum yang terjadi.

**Kata kunci:** fungsi kerapuhan, analisis riwayat waktu, gempa, respons spektrum

### 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia bertambah kian hari. Badan Pusat Statistik mengemukakan bahwa jumlah penduduk berdasarkan hasil sensus menunjukkan terjadinya peningkatan setiap lima tahun sekali. Di tahun 2015, jumlah penduduk di Indonesia adalah sebesar 238.580.000 jiwa dan pada tahun 2020 diestimasikan akan mencapai 271.060.000 juta jiwa. Oleh karena itu, kebutuhan akan fasilitas tempat tinggal meningkat sedangkan ruang yang tersedia sangatlah terbatas. Hal ini memicu dilakukan pembangunan gedung secara vertikal (gedung bertingkat). Akan tetapi, dalam merencanakan bangunan tingkat tinggi perlu memperhatikan keselamatan pengguna bangunan utamanya dalam menahan beban lateral akibat pengaruh beban gempa. Oleh karena itu, diperlukan tindakan pencegahan untuk meminimalisasi dampak yang dapat timbul akibat bahaya gempa. Salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi resiko akibat bahaya gempa adalah dengan membuat kurva kerapuhan dari suatu struktur bangunan. Kurva kerapuhan dari suatu struktur memudahkan untuk memprediksi/mengestimasi tingkat kemungkinan terlampauinya suatu kriteria ambang batas. Dengan adanya kurva kerapuhan, resiko secara keseluruhan dari struktur tersebut dapat dipertimbangkan termasuk potensi dampak ekonomi yang ditimbulkan (Tefamariam et al., 2013). Pada penelitian ini, suatu struktur gedung yang berada di kota Makassar dianalisis untuk mendapatkan kurva kerapuhan. Gedung ini merupakan salah satu gedung yang esensial sehingga perlu dilakukan kajian fungsi kerapuhan. Struktur gedung ini adalah struktur beton bertulang dengan menggunakan sistem rangka pemikul momen khusus pada arah-x dan sistem ganda pada arah-y.

#### 1.1 Fungsi Kerapuhan (*Fragility Function*)

Fungsi kerapuhan didefinisikan sebagai fungsi yang menggambarkan kemungkinan terlampaui suatu batas tertentu sesuai dengan tingkat getaran tanah (Sangadji et al., 2017). Fungsi ini menghubungkan antara intensitas gempa dengan kemungkinan terlampauinya suatu batas tertentu. Oleh karena itu, fungsi kerapuhan merupakan parameter dari satu intensitas skalar yang mencerminkan intensitas seismik, seperti percepatan puncak tanah (*peak ground acceleration*), spektral percepatan ( $S_a$ ), spektral perpindahan ( $S_d$ ), atau intensitas lainnya (Bakalis

dan Vamvatsikos, 2018). Dengan membuat fungsi kerapuhan, tingkat kerentanan dari suatu struktur bangunan dapat dievaluasi (Vasavada dan Patel, 2016).

Secara umum, persamaan fungsi kerapuhan merupakan kurva lognormal yang menghubungkan antara intensitas skalar terukur terhadap probabilitas terlampaui dari suatu batas tertentu (FEMA, 2003).

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

dimana,  $\varphi$  adalah fungsi distribusi kumulatif (lognormal),  $\beta_{ds}$  adalah standar deviasi lognormal dari spektral perpindahan terhadap suatu batas kerusakan (*damage state*) tertentu dan  $\bar{S}_{d,ds}$  adalah nilai tengah dari spektral perpindahan yang mencapai ambang batas kerusakan  $ds$ . Fungsi lognormal umum digunakan karena dapat merepresentasikan berbagai macam data kegagalan komponen struktur secara baik (Aslani, 2005; Pagni dan Lowes, 2006).

Namun demikian, variabel  $S_d$  pada persamaan (1) dapat digantikan menjadi parameter lainnya seperti percepatan puncak tanah (*peak ground acceleration*), spektral percepatan ( $S_a$ ), ataupun parameter lainnya yang menggambarkan intensitas seismik, sedangkan untuk *damage state* dapat disesuaikan dengan standar/acuan yang ingin digunakan. Pada penelitian ini, *damage state* yang digunakan adalah batas kerusakan yang diambil dari ATC-40.

Tabel 1. *Damage State* menurut ATC-40

Batas <i>interstory drift</i>	<i>Damage State</i>		
	<i>Immediate Occupancy (IO)</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>
Perpindahan maksimum pada lantai teratas (atap)	0,01	0,01-0,02	0,02
Inelastik <i>drift</i> maksimum	0,005	0,005-0,015	No Limit

## 1.2 Analisis Riwayat Waktu

Umumnya, terdapat dua cara untuk membuat fungsi kerapuhan struktur, yaitu dengan melakukan analisis lateral statik nonlinear atau yang lebih dikenal dengan nama analisis *pushover* dan analisis riwayat waktu. Pada analisis *pushover*, kurva kapasitas dibuat terlebih dahulu. Kurva kapasitas ini menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan lantai teratas (atap). Setelah itu, memilih *damage state* yang ingin digunakan untuk dapat menetapkan nilai median perpindahan berdasarkan masing-masing kondisi *damage state* yang digunakan. Salah satu kondisi ambang batas *damage state* yang biasanya digunakan dalam analisis *pushover* untuk membentuk kurva kerapuhan dari struktur adalah kondisi ambang batas yang diusulkan oleh Barbat *et al* (2008). Barbat *et al* (2008) membagi ambang batas *damage struktur* ke dalam 4 tahapan, yaitu *slight*, *moderate*, *severe* dan *complete*, di mana keempat ambang batas ini merupakan fungsi dari perpindahan luluh dan perpindahan ultimit dari struktur yang ditinjau.

Untuk analisis riwayat waktu, rekaman gempa berdasarkan kejadian di masa lalu digunakan dalam analisis ini untuk mendapatkan kinerja dari struktur yang ditinjau. Rekaman gempa tersebut berupa grafik hubungan percepatan tanah terhadap waktu pada gempa-gempa yang sudah terjadi pada masa lalu. Setelah itu, respons dari struktur digunakan sebagai variabel untuk membentuk kurva kerapuhan struktur. Respons struktur tersebut dapat berupa spektral perpindahan, spektral percepatan, rasio *drift* dan sebagainya. Penelitian ini menggunakan analisis riwayat waktu untuk menghasilkan fungsi kerapuhan struktur. Analisis riwayat waktu yang digunakan adalah *linear time history analysis*. Beban-beban yang dipertimbangkan dalam analisis riwayat waktu adalah beban mati dan beban hidup. Tabel 2 menunjukkan beban mati dan beban hidup yang digunakan.

Tabel 2. Beban mati dan beban hidup yang digunakan

No	Beban	Nilai
1	Beban Mati Tambahan	2,7 kN/m <sup>2</sup>
2	Beban <i>Water Roof Tank</i>	138,674 kN
3	Beban Hidup (bervariasi tergantung fungsi ruangan)	0,96 kN/m <sup>2</sup> - 3,83 kN/m <sup>2</sup>

### 1.3 Uji Kolmogorov-Smirnov

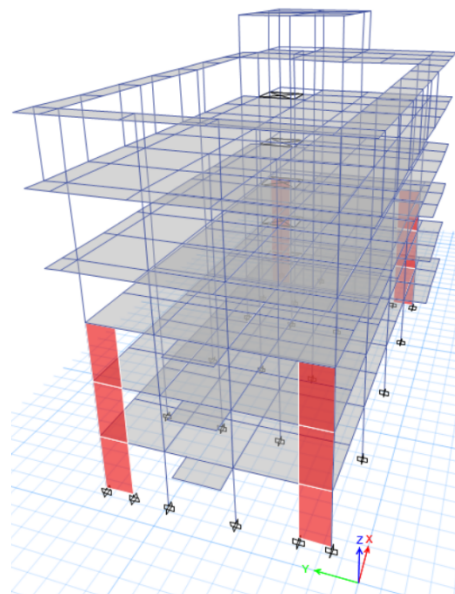
Uji Kolmogorov-Smirnov merupakan uji untuk menentukan tingkat kesesuaian antara distribusi teoritis tertentu. Uji ini untuk menetapkan apakah nilai yang didapatkan secara masuk akal dianggap berasal dari suatu populasi tertentu dengan distribusi tertentu (Masset, F. J., 1951, Nuryadi et al., 2017). Pada penelitian ini, uji Kolmogorov-Smirnov digunakan untuk menguji apakah data yang didapatkan terdistribusi secara lognormal atau tidak. Prosedur pengujian Kolmogorov-Smirnov dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Menghitung frekuensi kumulatif dari data yang didapatkan,  $F(x_i)$ .
- Menentukan nilai  $S(x_i)$  untuk tiap data.
- Menghitung selisih absolut antara nilai  $F(x_i)$  dan  $S(x_i)$ .
- Menentukan nilai maksimum selisih absolut antara nilai  $F(x_i)$  dan  $S(x_i)$ .
- Jika selisih absolut < nilai maksimum yang disyaratkan, maka data tersebut terdistribusi secara lognormal.

## 2. METODE

Gedung yang ditinjau dalam penelitian ini adalah salah satu gedung yang ada pada kota Makassar yang mempunyai 7 tingkat dengan tinggi total bangunan sebesar 28 meter. Sistem struktur gedung ini menggunakan sistem rangka pemikul momen khusus (beton bertulang) pada arah x serta sistem ganda pada arah y. Gambar 1 menunjukkan perspektif gedung yang ditinjau.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan kurva kerapuhan dari struktur gedung tersebut pada arah-x dan arah-y sehingga dapat mengecek batasan dari masing-masing *damage state* guna dapat memberikan informasi kepada pihak-pihak yang mempunyai kepentingan. Semua analisis dikerjakan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ETABS v.16.0.2.



**Gambar 1.** Tampak perspektif bangunan gedung yang ditinjau

Tabel 3 menunjukkan elevasi tiap lantai dari gedung yang ditinjau.

Properti material yang digunakan pada gedung yang ditinjau adalah sebagai berikut:

- Material beton yang digunakan mempunyai kuat tekan ( $f_c'$ ) 25 MPa.
- Baja tulangan dengan diameter  $\geq 10$  mm mempunyai kuat luluh ( $f_y$ ) sebesar 400 MPa.
- Baja tulangan dengan diameter < 10 mm mempunyai kuat luluh ( $f_y$ ) sebesar 240 MPa.

Adapun ukuran penampang yang digunakan pada gedung yang ditinjau dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 3.** Elevasi tiap lantai

No.	Lantai	Elevasi tiap lantai (m)	Tinggi tiap lantai (m)
1	Lantai 1	0,00	4,00
2	Lantai 2	4,00	4,00
3	Lantai 3	8,00	4,00
4	Lantai 4	12,00	4,00
5	Lantai 5	16,00	4,50
6	Lantai 6	20,50	4,00
7	Lantai atap	24,50	3,50
8	Atap	28,00	0,00

**Tabel 4.** Ukuran penampang elemen struktur kolom dan balok

Elemen Struktur	Ukuran Penampang yang digunakan	
	Panjang (mm)	Lebar (mm)
Kolom	600	600
	500	500
	400	400
	200	300
	400	400
Balok	Lebar (mm)	Tinggi (mm)
	300	500
	300	400
	300	600
	200	400
	200	400
	150	400
	150	250
	300	500
	200	400
	350	650
	350	650
	300	500
	300	400
	300	600
300	400	
350	800	
350	400	

Untuk elemen struktur pelat digunakan pelat dengan tebal 120 mm elemen struktur dinding geser terletak pada tepi bangunan pada arah sumbu-y saja, setiap dinding geser memiliki tebal 300 mm dan lebar 1700 mm. Elemen struktur pelat dimodelkan sebagai membran dan untuk elemen dinding geser dimodelkan sebagai elemen *shell*.

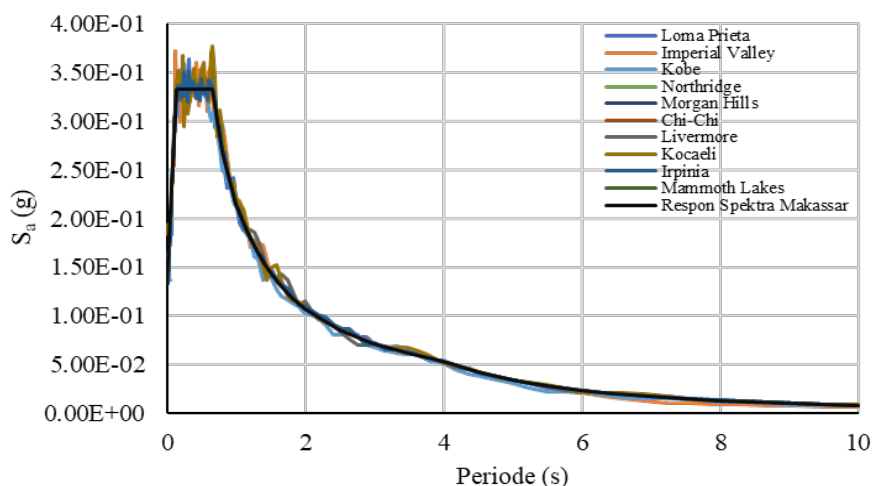
Bangunan termasuk dalam kategori resiko IV dan memiliki faktor keutamaan gempa 1,5 sedangkan untuk parameter percepatan gempa yang digunakan diambil dari aplikasi respon spektra yang disesuaikan dengan peta percepatan gempa tahun 2019, yaitu sebesar  $S_s$  0,2156g dan  $S_1$  sebesar 0,1070g.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan 10 rekaman gempa yang diskalakan terlebih dahulu dengan respons spektrum kota Makassar yang akan digunakan selanjutnya untuk analisis (SNI 1729-2019). Kesepuluh rekaman gempa tersebut dapat dilihat pada Tabel 5. Data rekaman gempa diambil dari situs resmi PEER Berkeley. Untuk penyesuaian rekaman gempa (*spectral matching*) dan analisis struktur menggunakan bantuan perangkat lunak ETABS v.16.0.2. Teknik *time domain* digunakan untuk pengskalaan rekaman gempa. Teknik *time domain* untuk penyesuaian rekaman gempa digunakan karena teknik ini lebih efisien jika dibandingkan dengan teknik *frequency domain* pada beberapa referensi penelitian terdahulu (Reyes et al., 2014, Adekristi et al., 2013). Selain itu, metode ini lebih direkomendasikan dikarenakan memiliki sifat kekonvergenan yang baik dan mempertahankan karakteristik riwayat waktu dibandingkan dengan metode lainnya (Abdulkareem dan Abbas, 2020). Salah satu contoh penyesuaian rekaman gempa yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan respons spektrum dari berbagai rekaman gempa yang telah disesuaikan terlebih dahulu dengan respons spektrum kota Makassar.

**Tabel 5.** PGA untuk masing-masing rekaman gempa yang telah diskalakan

No	Earthquake name	PGA arah x (g)	PGA arah y (g)
1	Imperial Valley, 1940	0,1593	0,1366
2	Northridge, 1994	0,1325	0,1484
3	Kobe, 1995	0,1378	0,1506
4	Loma Prieta, 1989	0,1371	0,1531
5	Mammoth Lake, 1980	0,1512	0,1579
6	Kocaeli, 1999	0,1841	0,1441
7	Chi-Chi, 1999	0,1521	0,1525
8	Irpinia, 1980	0,1283	0,1440
9	Livermore, 1980	0,1438	0,1301
10	Morgan Hills, 1984	0,1364	0,1364



**Gambar 2.** Respon spektrum dari rekaman gempa yang telah diskalakan

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan kurva kerapuhan untuk arah-x dan arah-y untuk masing-masing *damage states* dimana pada penelitian ini diambil tiga *damage states*, yaitu *Immediate Occupancy*, *Damage Control*, dan *Life Safety*. Kurva yang digunakan adalah kurva distribusi lognormal berdasarkan uji Kolmogrov-Smirnov dengan mengambil tingkat signifikansi sebesar 5%. Tabel 6 menunjukkan nilai maksimum kesalahan yang disyaratkan berdasarkan uji Kolmogrov-Smirnov dengan tingkat signifikansi 5%. Tabel 4 menunjukkan salah satu contoh perhitungan untuk menentukan bahwa data tersebut terdistribusi secara lognormal atau tidak dengan menggunakan uji Kolmogrov Smirnov. Tabel 7 dan Tabel 8 masing-masing menunjukkan nilai maksimum kesalahan yang didapatkan dengan jumlah 10 data untuk *damage state Immediate Occupancy* arah-x dan arah-y.

**Tabel 6.** Nilai maksimum kesalahan yang disyaratkan uji Kolmogrov-Smirnov untuk tingkat signifikansi 5%

Jumlah data	Nilai maksimum kesalahan yang disyaratkan
5	0,56
10	0,41
15	0,34
20	0,29
25	0,27
30	0,24

**Tabel 7.** Contoh perhitungan uji Kolmogrov Smirnov untuk *damage state Immediate Occupancy* pada arah-x

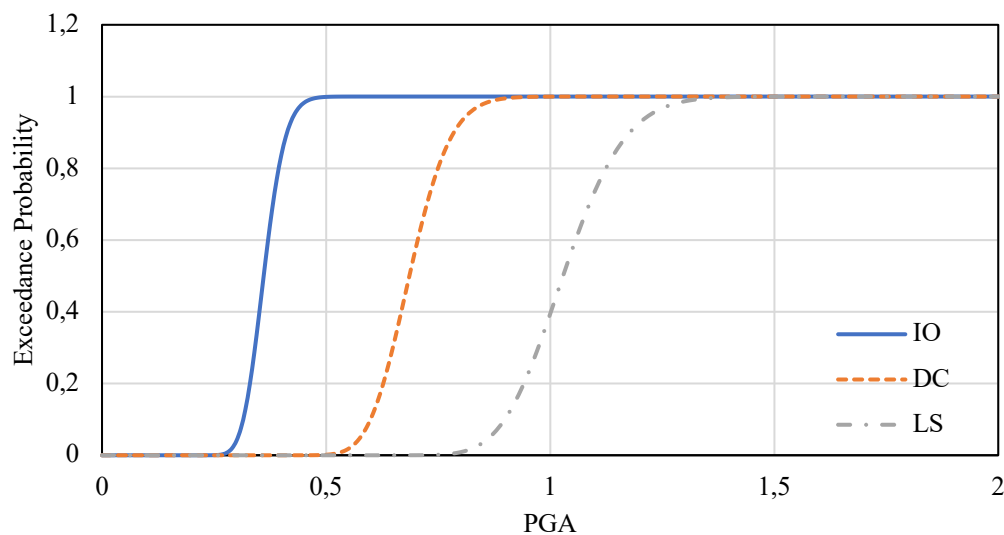
No	Rekaman Gempa	Scaled PGA	F(x <sub>i</sub> ) lognormal	S(x <sub>i</sub> )	F(x <sub>i</sub> )-S(x <sub>i</sub> )
1	Kobe	0,3026	0,0477	0,1	0,0523
2	Northridge	0,3038	0,0516	0,2	0,1484
3	Irpinia	0,3078	0,0663	0,3	0,2337
4	Chi-Chi	0,3296	0,1956	0,4	0,2044
5	Morgan Hills	0,3320	0,2157	0,5	0,2843
6	Livermore	0,3373	0,2615	0,6	0,3385
7	Mammoth Lake	0,3461	0,3471	0,7	0,3529
8	Imperial valley	0,3798	0,6864	0,8	0,1136
9	Loma Prieta	0,3979	0,8232	0,9	0,0768
10	Kocaeli	0,4122	0,8966	1	0,1034
D <sub>n</sub> maks					0,3529

**Tabel 8.** Contoh perhitungan uji Kolmogrov Smirnov untuk *damage state Immediate Occupancy* pada arah-y

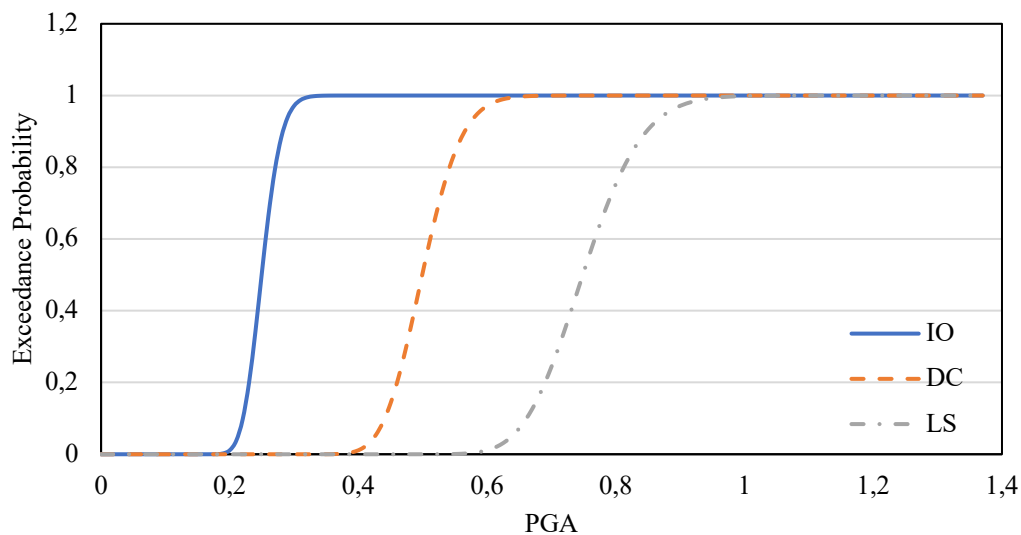
No	Rekaman Gempa	Scaled PGA	F(x <sub>i</sub> ) lognormal	S(x <sub>i</sub> )	F(x <sub>i</sub> )-S(x <sub>i</sub> )
1	Kobe	0,2413	0,0161	0,1	0,0839
2	Northridge	0,2583	0,3002	0,2	0,1002
3	Irpinia	0,2776	0,3520	0,3	0,0520
4	Chi-Chi	0,2405	0,3646	0,4	0,0354
5	Morgan Hills	0,2431	0,3820	0,5	0,1180
6	Livermore	0,2028	0,3945	0,6	0,2055
7	Mammoth Lake	0,2913	0,6399	0,7	0,0601
8	Imperial valley	0,2372	0,8162	0,8	0,0162
9	Loma Prieta	0,2723	0,8648	0,9	0,0352
10	Kocaeli	0,2424	0,9450	1	0,0550
D <sub>n</sub> maks					0,2055

Berdasarkan Tabel 6, nilai maksimum yang disyaratkan untuk jumlah data 10 adalah sebesar 0,41 sedangkan nilai maksimum yang didapatkan untuk arah x adalah sebesar 0,3529 dan untuk arah y adalah sebesar 0,2055 (Tabel 7 dan Tabel 8). Kedua nilai ini masih lebih kecil daripada nilai maksimum yang disyaratkan yaitu sebesar 0,41. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa data tersebut terdistribusi secara lognormal. Hal ini juga mengindikasikan bahwa kurva kerapuhan struktur juga terdistribusi secara lognormal.

Gambar 3 dan Gambar 4 masing-masing menunjukkan kurva kerapuhan struktur untuk arah-x dan arah-y. Kurva ini didapatkan dengan menggunakan data PGA berdasarkan *damage state* pada Tabel 1. Persamaan (1) digunakan untuk membentuk kurva kerapuhan dari struktur gedung yang ditinjau baik pada arah-x maupun arah-y. Sumbu-x pada gambar tersebut adalah nilai PGA dan pada sumbu-y adalah persentase kemungkinan mengalami *damage states* tersebut. Sebagai contoh, jika diambil nilai PGA sebesar 0,33g pada arah-x (Gambar 3), maka kemungkinan struktur tersebut akan mengalami kondisi *Immediate Occupancy* sebesar 19,9%. Sebaliknya jika kita mengambil nilai probabilitas sebesar 40%, maka kondisi ini akan tercapai pada saat PGA sebesar 0,3513g. Untuk *damage state* lain (*Damage Control* dan *Life Safety*), nilai PGA 0,33g masih memiliki tingkat kemungkinan tercapainya *damage state* tersebut adalah 0%.



**Gambar 3.** Kurva kerapuhan untuk arah-x



**Gambar 4.** Kurva kerapuhan untuk arah-y

#### 4. KESIMPULAN

Percepatan tanah maksimum yang didapatkan berdasarkan aplikasi RSA-2019 untuk kota Makassar adalah sebesar 0,2668 untuk kondisi tanah lunak. Oleh karena itu, berdasarkan hasil yang didapatkan bahwa kemungkinan terlampauinya percepatan tanah maksimum masih berada pada damage state immediate occupancy baik untuk kurva kerapuhan arah-x maupun arah-y. Jika melihat Gambar 3 dan Gambar 4, didapatkan bahwa kemungkinan struktur akan mengalami kondisi immediate occupancy sebesar 4,02% untuk arah-x sedangkan untuk arah-y, kemungkinan struktur akan mengalami kondisi immediate occupancy sebesar 79,22%.

#### PUSTAKA

- Abdulkareem, A.J. dan Abbas, R.M. 2020. Geometric Nonlinear Time Domain Spectral Matching Seismic Analysis of Base Isolated High-Rise Buildings Including P-Delta Effect. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15 (5).
- Adekristi, A., Leon, R.T. and Rodriguez, M A. 2013. *Algorithm for Spectral Matching of Earthquake Ground Motions Using Wavelets and Broyden Updating*. Thesis of Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung*. Jakarta: BSN. SNI 1726-2019. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Applied Technology Council. 1996. ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Redwood City, California, U.S.A. DC.
- Aslani, H. 2005. Probabilistic Earthquake Loss Estimation and Loss Disaggregation in Buildings. *Doctoral Thesis*. Stanford University, Stanford, CA.
- Bakalis, K. dan Vamvatsikos, D. 2018. Seismic Fragility Functions via Nonlinear Response History Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 144 (10). American Society of Civil Engineering.
- 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: 851–865.
- Federal Emergency Management Agency. 2003. *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS@MH MR4 Technical Manual*. Washington, D.C.
- Massey, F. J., Jr. 1951. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46 (253): 68-78.
- Nuryadi, Astuti, T.D., Utami, E.S. dan Budiantara, M. 2017. *Dasar-Dasar Statistik Penelitian*. Yogyakarta: Sibuku Media.
- Pagni, C.A. dan Lowes, L.N. 2006. Fragility Function for Older Reinforced Concrete Beam-Column Joints. *Earthquake Spectra*, 22: 215-238.
- Reyes, J.C., Riaño, A.C., Kalkan, E., Quintero, O.A. dan Carlos, M. 2014. *Is Time-Domain Spectrum Matching Procedure Accurate and Efficient for Response History Analysis of Buildings?*. Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul, Turkey.
- Sangadji, S., Wibowo, N.A., Tropormera, E.N. dan Purwanto, E. 2017. *Fragility Function for Assessing Seismic Risk of Typical Concrete Bridge by Means of Nonlinear Static and Dynamic Analysis*. MATEC Web of Conferences 138.
- Tesfamariam, S., Silva, M.S. dan Rajeev, P. 2013. Effect of Topology Irregularities and Construction Quality on Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 17 (4). Taylor & Francis Group.
- Vasavada, M. dan Patel, V.R. 2016. Development of Fragility Curves for RC Buildings using HAZUS method. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3 (5).