

ANALISIS KERAPUHAN STRUKTUR GEDUNG GSL UNMER MADIUN DENGAN PUSHOVER ANALYSIS

*Rosyid Kholilur Rohman¹, Arif Afrianto², Rendi Gusta Wibowo³

^{1, 2, 3} Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Madiun, Kota Madiun

*) Email: rosyid@unmer-madiun.ac.id

ABSTRACT

This study examines the fragility curve of the GSL building of Merdeka University of Madiun which was built around 1995 with reference to the SNI 1726:1989 standard. This building is an educational building with a structure using reinforced concrete. Modeling and structural analysis using ETABS software. Loading refers to SNI 1727 2020 and SNI 1726 2019. The analysis was carried out using the pushover analysis method referring to ATC-40. The fragility curve developed describes the probability of damage at various levels of Spectral Displacement (S_d). From this study, the base shear due to earthquake force was 4214 kN. The maximum value of base shear was 7890 kN and the maximum displacement of 0.359 m. Based on the conversion results obtained S_d at performance point 0.082 m, the probability for slight damage limits is 95%, moderate 78%, extensive 70%, and complete 45%. This research provides a basis for structural retrofit planning to increase the structural capacity of buildings due to earthquake load.

Keyword: fragility curve, pushover analysis, earthquake load, SRPMK, building structure

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji kurva kerapuhan Gedung GSL Universitas Merdeka Madiun yang dibangun sekitar tahun 1995 dengan mengacu pada standar SNI 1726:1989. Gedung ini merupakan bangunan pendidikan dengan struktur menggunakan beton bertulang. Pemodelan dan analisis struktur menggunakan software ETABS. Pembebanan mengacu SNI 1727 2020 dan SNI 1726 2019. Analisis dilakukan menggunakan metode *pushover analysis* mengacu ATC-40. Kurva kerapuhan yang dikembangkan menggambarkan probabilitas terjadinya kerusakan pada berbagai tingkat *Spectral Displacement* (S_d). Dari penelitian ini didapatkan base shear akibat gaya gempa sebesar 4214 kN. Nilai maksimum gaya geser dasar sebesar 7890 kN dan displacement maksimumnya sebesar 0.359 m. Berdasar hasil konversi didapat S_d pada *performance point* 0.082 m maka diperoleh probabilitas untuk batas kerusakan *slight* 95%, *moderate* 78%, *extensive* 70%, dan *complete* sebesar 45%. Penelitian ini memberikan dasar untuk perencanaan *retrofit* struktur guna meningkatkan kapasitas struktur gedung akibat beban gempa.

Kata kunci: kurva kerapuhan, analisis *pushover*, beban gempa, SRPMK, struktur gedung

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada pada pertemuan 3 lempeng tektonik aktif. Ketiga lempeng tektonik tersebut yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik dan Lempeng Eurasia [1]. Posisi geografis ini menyebabkan wilayah Indonesia, termasuk Kota Madiun di Provinsi Jawa Timur, memiliki risiko tinggi terhadap bencana gempa bumi. Berdasarkan SNI 1726:2019, wilayah Madiun dan sekitarnya tergolong sebagai wilayah dengan risiko gempa sedang hingga tinggi [2].

Gedung Graha Samiarto Laksono (GSL) Unmer Madiun adalah salah satu gedung pendidikan yang dibangun sekitar tahun 1995. Gedung ini terletak di Jl. Serayu 79 Kota Madiun. GSL dirancang dengan mengacu pada standar teknis SNI 1726:1989 yang mengatur ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung di Indonesia. Gedung ini difungsikan untuk ruang kelas dan kantor. Sistem struktur menggunakan SRPMK. Dengan lokasi di wilayah Madiun yang memiliki potensi gempa menengah, ketahanan struktur terhadap beban gempa menjadi aspek krusial untuk menjamin keselamatan penghuni dan keberlanjutan fungsi bangunan selama umur layannya.

Pada saat pembangunan, desain struktur mengikuti SNI yang berlaku pada saat itu yaitu SNI 1726:1989. Dalam perkembangannya di Indonesia berlaku SNI 1726 2002 dan diperbarui dengan SNI 1726 2012. Pada tahun 2019 BSN menetapkan SNI 1726 2019 yang merujuk ASCE 7-16 [3]. Perkembangan standar gempa tersebut menuntut evaluasi ulang ketahanan bangunan lama dengan mengacu standar yang berlaku saat ini. Salah satu metode yang efektif untuk menilai performa struktur terhadap gempa adalah pengembangan kurva kerapuhan (*fragility curve*) [4], [5]. Kurva ini merepresentasikan hubungan probabilitas terjadinya tingkat kerusakan tertentu dengan parameter intensitas gempa [6].

Penelitian tentang Analisa kerapuhan struktur gedung telah dilakukan terhadap salah satu gedung 7 lantai di Makasar. Hasil penelitian menunjukkan kemungkinan struktur bangunan akan mengalami mencapai level kinerja *immediate occupancy* (IO) sebesar 4,02% (untuk arah x) dan 79,22% (untuk arah y) dengan pertimbangan percepatan tanah maksimum [7]. Penelitian lainnya dilakukan oleh Narwastu dkk dengan obyek Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan. Hasil penelitian menunjukkan kurva kerapuhan dapat digunakan untuk memperkirakan probabilitas terjadinya kerusakan akibat gempa baik pada kategori ringan, sedang, *ekstensif*, dan

berat [3]. Penelitian lain terkait kurva kerapuhan menunjukkan efektifitas penggunaan kurva kerapuhan untuk menghitung probabilitas kerusakan bangunan gedung akibat gempa [8]–[12]. Kurva kerapuhan juga dapat digunakan pada struktur eksisting jembatan [13], [14].

Penelitian ini bertujuan mengembangkan kurva kerapuhan pada gedung GSL Unmer Madiun dengan pendekatan simulasi numerik menggunakan metode *pushover analysis* dengan program bantu software analisis struktur ETABS. Hasil dari penelitian ini dapat menjadi dasar untuk pengelola gedung dalam mitigasi risiko, perencanaan retrofit, dan pengambilan keputusan terkait pengelolaan gedung agar dapat lebih tahan terhadap gaya gempa.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan analisis kuantitatif. Langkah-langkah penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengumpulan data, baik data primer maupun sekunder. Data primer berupa pengukuran di lapangan terhadap komponen struktur, survey terkait arsitektur bangunan, dan pengujian kuat tekan beton dengan *hammer test*.
2. Menentukan metode yang digunakan yaitu *static non-linear pushover*.
3. Membuat model struktur bangunan eksisting menggunakan software ETABS.
4. Melakukan analisis struktur dengan input beban sesuai SNI yang berlaku. Analisis beban gravitasi merujuk SNI 1727 2020 [15] dan analisis beban gempa merujuk SNI 1726 2019 [3].
5. Menentukan properti material yang digunakan, dan menentukan dimensi komponen struktur.
6. Memasukkan beban-beban yang bekerja pada model struktur.
7. Melakukan analisis static pushover dengan memanfaatkan *tool* yang disediakan ETABS. Langkah analisis didahului dengan penentuan sendi plastis pada balok dan kolom. Selanjutnya dilakukan pendefinisian static non-linear case dengan memasukkan beban gempa [16].
8. Menentukan batasan kurva kerapuhan menggunakan metode HAZUS ® MH MR4 [17].
9. Membuat kurva kerapuhan dan merumuskan kesimpulan

Pemodelan Struktur

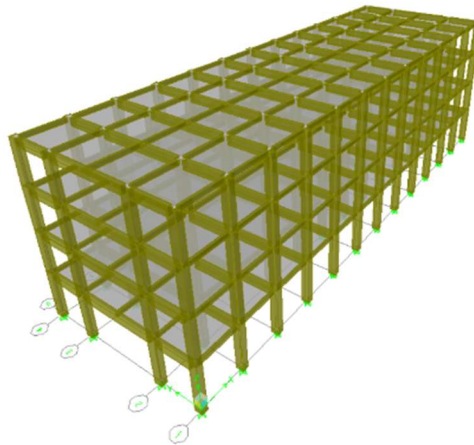
Obyek penelitian ini adalah gedung GSL yang fungsi utamanya sebagai kantor dan ruang kelas. Bangunan GSL merupakan bangunan 4 lantai dengan tinggi bangunan total 16,5 m. Lantai 1 memiliki tinggi 4,5 m, sedangkan lantai lainnya memiliki tinggi 4 meter. Bangunan GSL memiliki panjang 48 m, sedangkan lebarnya 16 meter. Jarak antar kolom pada arah x 4 m dan pada arah y memiliki bentang maksimum 8 m. Dimensi kolom eksisting K1 500x700. Balok terdiri dari 3 tipe yang diberi kode B1 (400×800 mm), B2 (300×600 mm), dan B3 (200×400 mm). Pada struktur gedung ini pelat lantai eksisting memiliki ketebalan 120 mm.

Konstruksi gedung menggunakan struktur beton bertulang dengan SRPMK. Pemodelan struktur eksisting bentuk portal 3 dimensi menggunakan program ETABS. Dalam analisis juga dilakukan analisis *static non-linear pushover*. Model struktur 3D diperlihatkan seperti pada Gambar 2, dan tipikal *floor plan* lantai 1 sampai 4 ditampilkan pada Gambar 3.

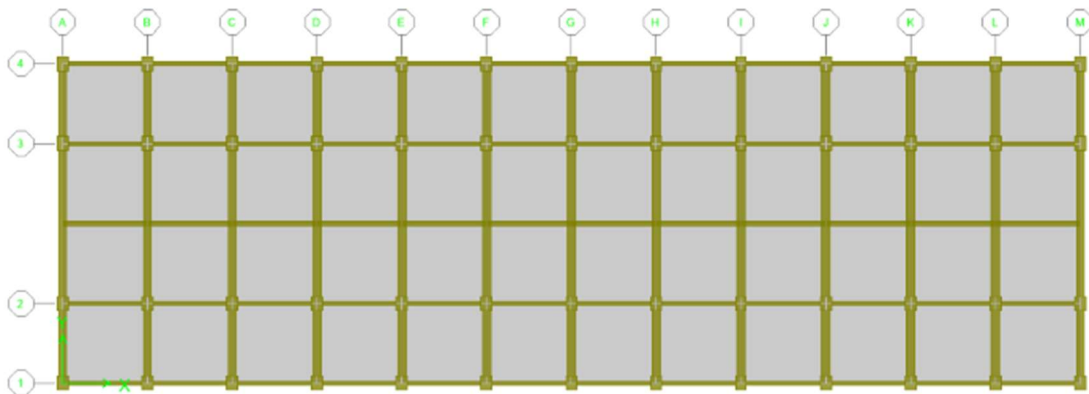
Properti Material

Properti material yang dipakai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| - Mutu beton | = 25 MPa |
| - Berat per unit volume beton | = 24 KN/m ³ |
| - Modulus elastisitas beton | = 23500 MPa |
| - Mutu baja tulangan longitudinal | = 400 MPa |
| - Mutu baja tulangan geser | = 280 MPa |
| - Modulus elastisitas baja Es | = 2.10 ⁵ MPa |



Gambar 1. Model 3D struktur gedung



Gambar 2. Model tipikal *floor plan*

Analisis Pembebanan

Analisis beban mati dan hidup mengacu SNI 1727:2020. Berat sendiri balok, kolom dan plat dihitung otomatis oleh software ETABS. Beban mati tambahan (SIDL) pada pelat lantai sebesar 1.5 kN/m^2 , sedang SIDL pada pelat atap sebesar 1.0 kN/m^2 . Berat sendiri dinding 10 KN/m . Beban hidup untuk masing-masing ruang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Beban hidup masing-masing ruang

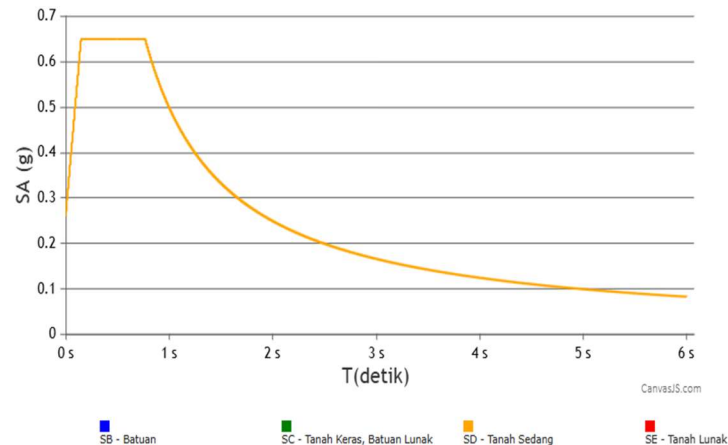
Ruang	Beban (KN/m^2)
Kelas	1,92
Kantor	2,40
Lobby	4,79
Rapat	4,79
Koridor	4,79

Berdasarkan [3], mengenai beban gempa, kategori risiko bangunan pendidikan termasuk dalam kategori IV, dengan faktor kepentingan seismik sebesar 1,5. Klasifikasi tanah berdasar data SPT adalah tanah sedang. *Spectrum response design* ditunjukkan pada Gambar 3. Analisis beban gempa dihitung berdasarkan respon spektra dari laman website rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021 sesuai koordinat lokasi bangunan -7.616667, 111.533333 dan diperoleh nilai:

- $S_s = 0,8159$
- $S_1 = 0,3801$
- $F_a = 1,177$
- $F_v = 1,539$
- $S_{ds} = 0,64$
- $S_{d1} = 0,49$

- Periode Panjang = 12 detik

Dari data di atas dapat diperoleh koefisien respon seismik $C_s = 0,12$. Jika berat total bangunan sebesar $W = 35116$ KN, maka akan diperoleh gaya geser dasar akibat beban gempa, $V = C_s \cdot W = 4214$ KN. Selanjutnya dibuat kombinasi beban dengan 18 kombinasi beban berdasarkan Standar Nasional Indonesia SNI 1726:2019.

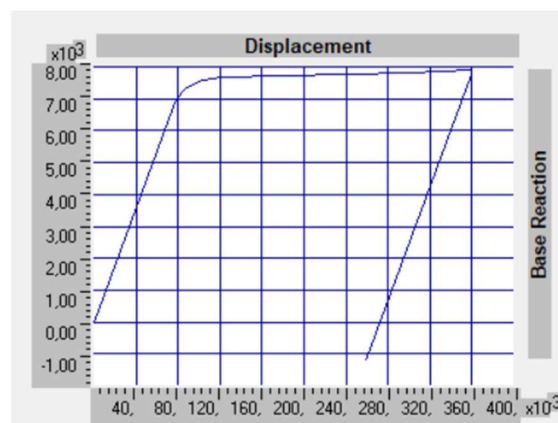


Gambar 3. *Spectrum Response Design*

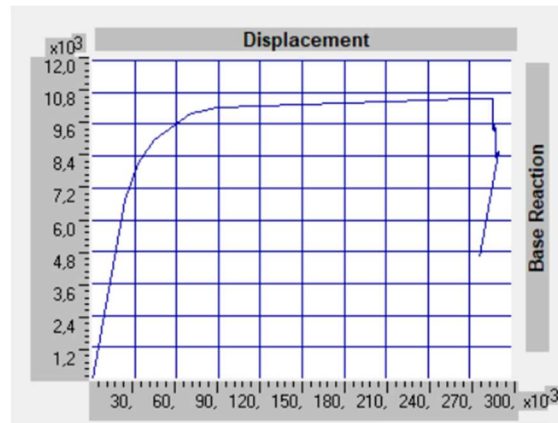
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva Kapasitas

Analisa beban dorong (*pushover analysis*) adalah analisa beban dorong dengan beban statik yang bersifat non-linier yang bekerja pada gedung secara bertahap hingga struktur mencapai batas plastis dan beban terus ditingkatkan hingga gedung tersebut mengalami keruntuhan. Dari analisis *pushover* akan diperoleh kurva kapasitas yang menunjukkan kemampuan struktur untuk menahan gaya horizontal akibat beban seismik. Kinerja struktur untuk setiap pendekatan dibandingkan berdasarkan kurva kapasitas dan pola kerusakan global. Kurva ini diperoleh dengan menerapkan beban dorong lateral secara bertahap pada model struktur hingga mencapai kondisi keruntuhan. Kurva kapasitas ditampilkan pada Gambar 4 (arah X) dan Gambar 5 (arah Y). Dalam kedua kasus, kurva kapasitas menggambarkan respons non-linier struktur terhadap beban lateral. Gaya lateral maksimum pada arah X sebesar 7890 kN dengan *displacement* maksimum sebesar 0,359 m, sedangkan pada arah y gaya lateral maksimumnya 10572 KN dengan *displacement* sebesar 0,287 m.



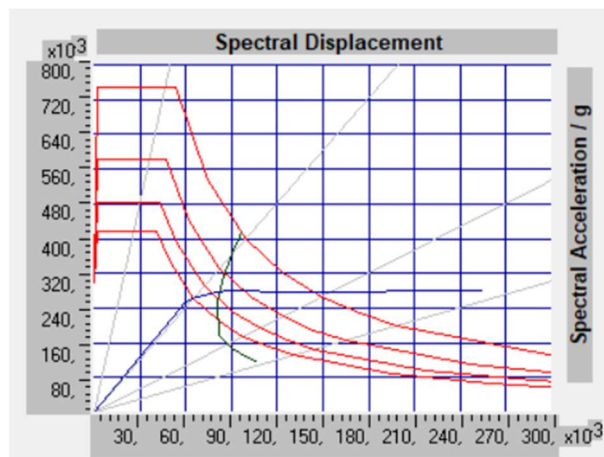
Gambar 4. Kurva Kapasitas (arah x)



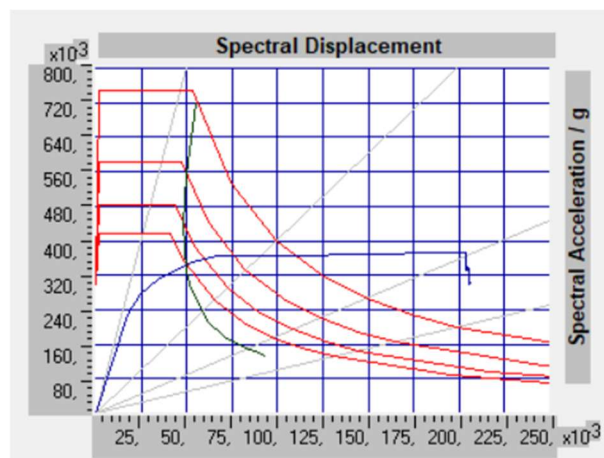
Gambar 5. Kurva Kapasitas (arah y)

Performance Point

Setelah mendapat kurva kapasitas pada analisis *pushover*, selanjutnya kurva tersebut diubah ke dalam format *Acceleration Displacement Spectrum Response (ADSR)*. Spektrum kapasitas pada arah x disajikan pada Gambar 6 dan untuk arah y disajikan pada Gambar 7. Pada Gambar 6 dan Gambar 7 tersebut dapat diketahui bahwa *Performance point* pada arah x didapat pada S_a 0,278 m dan S_d 0,082, sedang pada arah y didapat S_a sebesar 0,343 m dan S_d 0,049 m. Pada arah x diperoleh *performance point* pada nilai gaya lateral (V_x) sebesar 7652 kN dan *displacement* (D_x) sebesar 0,113 m, sedangkan pada arah y *performance point* pada V_y 9797 kN dan D_y 0,065 m.



Gambar 6. Performance point (arah x)

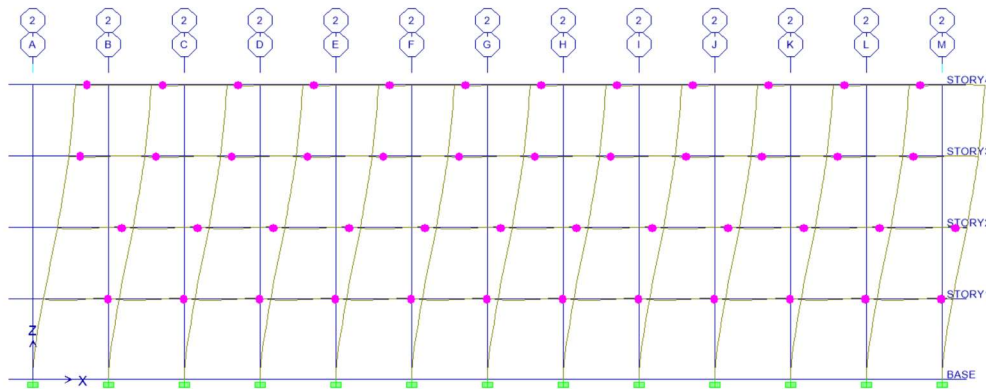


Gambar 7. Performance point (arah y)

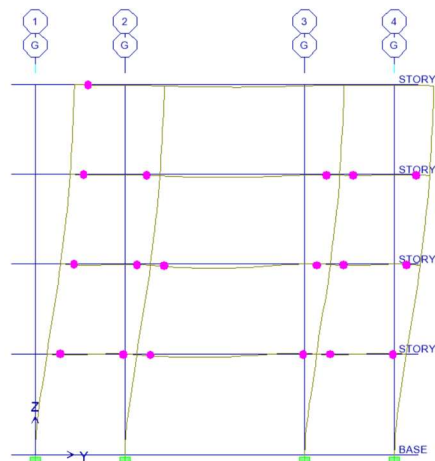
Distribusi Sendi Plastis

Analisis terbentuknya sendi plastis akan menghasilkan distribusi sendi plastis dan digambarkan dalam visualisasi 3D yang menginterpretasikan kondisi kerusakan maksimum struktur. Gambar 8 menunjukkan distribusi sendi plastis pada arah X (langkah ke-3), sedangkan pada Gambar 9 menunjukkan distribusi sendi plastis pada arah Y (langkah ke-3).

Baik pada arah x maupun y dapat dilihat bahwa terjadinya sendi plastis yang pertama kali pada balok lantai 2. Selanjutnya sendi plastis menjalar ke struktur balok lantai di atasnya. Pada *step* selanjutnya terbentuk sendi plastis pada kolom. Hal ini menunjukkan bahwa struktur gedung GSL eksisting sudah sesuai dengan konsep perencanaan struktur kolom kuat-balok lemah.



Gambar 8. Distribusi sendi plastis (arah X)



Gambar 9. Distribusi sendi plastis (arah Y)

Kurva Kerapuhan

Kurva kerapuhan dibuat untuk mengetahui probabilitas kemungkinan kerusakan dengan menggunakan batasan kerusakan struktur yang dinyatakan dengan parameter spektral tertentu. Analisis kerapuhan seismik dilakukan untuk mendapatkan nilai probabilitas kerusakan gedung. Dalam penelitian digunakan parameter *Spectral Displacement* (S_d). Probabilitas kegagalan struktur diukur dan dihitung untuk mendapatkan nilai probabilitas dan kategori ambang batas kerusakan (*damage state*). Nilai probabilitas kegagalan struktur dapat dihitung menurut persamaan berikut:

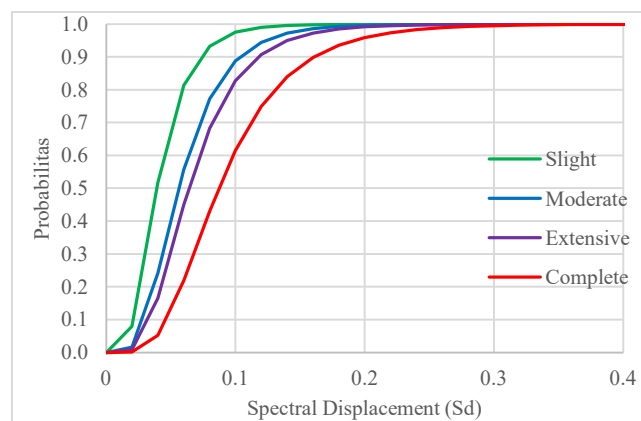
$$P(ds | S_d) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_{ds}}\right) \ln(S_d, ds) \quad (1)$$

dengan $P(ds | S_d)$ adalah probabilitas kerusakan (%), β_{ds} adalah nilai simpangan baku, (S_d, ds) adalah nilai median S_d pada *damage state* dan Φ adalah nilai kumulatif fungsi distribusi normal standar.

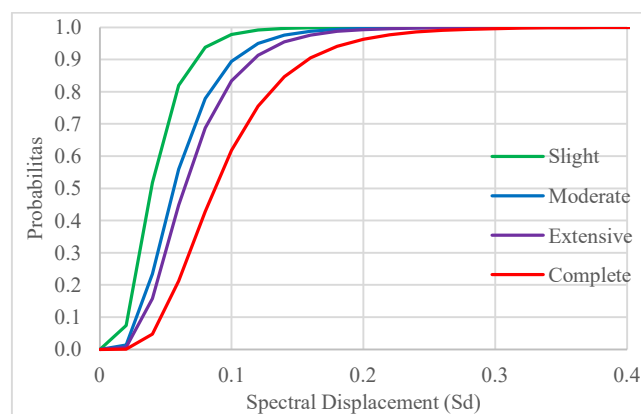
Nilai median S_d pada *damage state* untuk ambang batas ringan (*slight*) $S_{d,ds}=0,7D_y$, ambang batas sedang (moderat) $S_{d,ds}=D_y$, ambang batas ekstensif $S_{d,ds}=D_y+0,25.(D_u-D_y)$, dan ambang batas berat (*complete*) $S_{d,ds}=D_u$, dimana D_y adalah S_d pada kondisi leleh dan D_u adalah S_d pada kondisi ultimit. Nilai D_u dan D_y didapat dari hasil analisis

pushover dengan software ETABS. Nilai β_{ds} didapat sebesar 0,46. Berdasarkan hasil analisis, kurva kerapuhan seismik dengan 4 tipe kerusakan disajikan pada Gambar 10 untuk arah X dan Gambar 11 untuk arah Y.

Berdasar hasil konversi didapat S_d pada *performance point* 0.082 (arah X). Pada nilai S_d sebesar 0,082 diperoleh nilai *limit state slight* 95%, *limit state moderate* 78%, *limit state extensive* 70%, dan *limit state complete* 45%. Nilai S_d pada *performance point* arah Y sebesar 0,049. Pada nilai S_d 0,049 diperoleh nilai *limit state slight* 68%, *limit state moderate* 40%, *limit state extensive* 30%, dan *limit state complete* 15%. Dari hasil analisis pada kedua arah terlihat bahwa probabilitas kerusakan pada arah x lebih besar dari pada arah y.



Gambar 10. Kurva Kerapuhan (arah x)



Gambar 11. Kurva Kerapuhan (arah y)

4. KESIMPULAN

Berdasar analisis *pushover* yang telah dilakukan didapat *performance point* arah x pada nilai gaya lateral 7652 kN dan *displacement* 0,113 m, sedangkan pada arah y pada gaya lateral 9797 kN dan *displacement* 0,065 m. Dari analisis *pushover* juga diketahui distribusi sendi plastis yang terjadi. Sendi plastis pertama kali terjadi pada balok lantai 2, diikuti pada balok diatasnya dan selanjutnya pada kolom lantai dasar. Hal tersebut menunjukkan bahwa Gedung GSL memenuhi syarat kolom kuat-balok lemah sesuai kaidah SRPMK.

Penelitian ini berhasil mengembangkan kurva kerapuhan untuk Gedung GSL Unmer Madiun yang dibangun dengan acuan SNI 1726:1989. Gedung GSL memiliki kerentanan cukup signifikan terhadap gempa pada nilai *Spectral Displacement* (S_d) 0,082 dengan nilai probabilitas kerusakan berat 45%, kerusakan ekstensif 70, kerusakan moderat 78%, dan kerusakan ringan 95%. Kurva kerapuhan ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pekerjaan perkuatan struktur eksisting.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Riyadhi, W. Hasyim, and N. Suhana, "Perbandingan Respon Struktur Gedung Menggunakan Respon Spektra SNI 1726:2012 Dan SNI 1726:2019," *J. Rekayasa Infrastruktur*, vol. 7, no. 1, pp. 6–15, 2021.

- [2] Siti Ayu Kumala and Wahyudi, "Analisis Nilai PGA (Peak Ground Acceleration) Untuk Seluruh Wilayah Kabupaten Dan Kota Di Jawa Timur," *INERSIA Informasi dan Ekspose Has. Ris. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 12, no. 1, pp. 37–43, 2016.
- [3] BSN, "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non gedung," Jakarta, 2019.
- [4] Arum Narwastu, Senot Sangadji, Rida Handiana Devi, and Hendramawat Aski Safarizki, "Analisis kerapuhan struktur gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan dengan static adaptive pushover," *Padur. J. Tek. Sipil Univ. Warmadewa*, vol. 13, no. 1, pp. 89–96, 2024.
- [5] M. Mouhine and E. Hilali, "Seismic vulnerability assessment of RC buildings with setback irregularity," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 1, 2022.
- [6] N. D. Astuti, M. A. Alvita, S. Sangadji, A. P. Rahmadi, and E. Purwanto, "Rapid and in-depth analysis for seismic risk evaluation," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 909, no. 1, 2017.
- [7] R. Frans and Y. Arfiadi, "Analisis Fungsi Kerapuhan Struktur Dengan Menggunakan Analisis Riwayat Waktu," in *Prosiding Seminar Nasional Riset dan Teknologi Terapan (RITEKTRA) X*, 2021, pp. 1–8.
- [8] A. N. Sari, S. Sangadji, and H. A. Saifullah, "Fragility and seismic risk of public building structures due to earthquake loads (Case study: Manahan Sports Building)," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1416, no. 1, 2024.
- [9] W. Hasyim, "ANALISIS KERAPUHAN SEISMIC STRUKTUR GEDUNG TAK BERATURAN DENGAN ANALISIS PUSHOVER," *J. "MITSU" Media Inf. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 119–130, 2025.
- [10] H. Sadraddin, "Fragility Assessment of High-Rise Reinforced Concrete Buildings," Western Michigan University, 2015.
- [11] Z. Irfan, Abdullah, and M. Afifuddin, "Development of fragility curve based on incremental dynamic analysis curve using ground motion Aceh earthquake," in *E3S Web of Conferences*, 2022, vol. 340, pp. 1–10.
- [12] A. Abdi, M. Hasan, and T. Saidi, "Studi Kerentanan Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi Akibat Gempa Di Kota Banda Aceh," *J. Civ. Eng. Student*, vol. 4, no. 1, pp. 22–28, 2022.
- [13] M. Mogheisi, H. Tavakoli, and E. Peyghaleh, "Fragility curve development of highway bridges using probabilistic evaluation (case study: Tehran City)," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 6, pp. 1783–1800, 2023.
- [14] V. C. Simanjuntak, I. Imran, and M. Moestopo, "The development of the seismic fragility curves of existing bridges in Indonesia (Case study: DKI Jakarta)," *Struct. Monit. Maint.*, vol. 10, no. 1, pp. 87–105, 2023.
- [15] BSN, "SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan Kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain," 2020.
- [16] R. G. Wibowo, R. K. Rohman, and S. D. Cahyono, "Seismic Evaluation of Existing Building Structures in the City of Madiun using Pushover Analysis," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1845, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [17] Federal Emergency Management Agency, "Hazardous® MH M R4 Technical Manual," Washington DC, 2003.