

Evaluasi Struktur Beton Pada Bangunan Eksisting Dengan Penambahan Sistem *Base Isolation* Berdasarkan *Seismic Fragility*

Sri wanto¹, Aprilia Wulandari², Sherly Devianty³

¹²³Teknik Sipil, Fakultas Komputer Dan Teknik, Universitas Linggabuana PGRI Sukabumi
www.unlip.ac.id

Abstrak

Bangunan eksisting sering mengalami penurunan performa akibat peningkatan beban gempa, sehingga memerlukan kekuatan struktur untuk meningkatkan kapasitas dan daya tahan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas penggunaan *base isolation* sebagai metode perkuatan struktur untuk mengurangi dampak energi seismik pada bangunan. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *seismostruct* dengan metode *Dynamic time history*. Hasil pemodelan mencakup kurva *interstory drift ratio* (ISDR), kurva histeresis, dan spektrum kapasitas. Data tersebut digunakan untuk membuat kurva kerapuhan, yang menunjukkan pengaruh signifikan penambahan *base isolation* dalam mengurangi risiko kerusakan akibat gempa. Penambahan sistem *base isolation* pada pondasi konstruksi ini dapat mengurangi terjadinya simpangan antar segmen/ *Interstory Drift Ratio* (ISDR) sebesar 44%. Selain itu juga diperoleh kurva kerapuhan menunjukkan bahwa dengan struktur sistem pondasi *base isolation* probabilitas kerusakan mengalami penurunan sebesar 70% pada kerusakan ringan berdasarkan *strain level* dan *maksimum base shear*. Sedangkan kerusakan sedang mengalami penurunan 40% berdasarkan *maksimum base shear*.

Kata kunci: Base Isolation, *Dynamic Time History*, *Interstory Drift Ratio*, Kurva Kerapuhan

Abstract

Existing buildings often experience a decrease in performance due to increased earthquake loads, requiring structural strengthening to increase capacity and durability. This study aims to evaluate the effectiveness of using base isolation as a structural strengthening method to reduce the impact of seismic energy on buildings. The analysis was conducted using *seismostruct* software with the *Dynamic time history* method. Modeling results included *inter-story drift ratio* (ISDR) curves, hysteresis curves, and capacity spectra. These data were used to create fragility curves, which showed the significant effect of adding base isolation in reducing the risk of earthquake damage. Adding a base isolation system to the foundation of this construction can reduce the occurrence of *Interstory Drift Ratio* (ISDR) by 44%. In addition, the fragility curve obtained shows that with the structure of the base isolation foundation system, the probability of minor damage has decreased by 70% based on *strain level* and *maximum base shear*. Meanwhile, moderate damage decreased by 40% based on *maximum base shear*.

Keywords: Base Isolation, *Dynamic Time History*, *Interstory Drift Ratio*, *Fragility Curve*

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang rawan gempa baik berupa gempa vulkanik maupun tektonik hal tersebut dikarenakan negara Indonesia berada diantara 4 (empat) lempeng tektonik yang tergolong aktif yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-

Australia, Lempeng Filipina serta Lempeng Pasifik[1]. Lempeng sendiri merupakan bagian dari kerak bumi yang mengapung di atas lapisan astenosfer serta bersifat plastis dan *mobile*. Hal tersebut mengakibatkan lempeng tektonik dapat bergerak dengan cukup bebas dan mampu berinteraksi antara lempeng satu dan yang

lainnya[2][3]. Masing-masing lempeng memiliki arah pergerakan yang berbeda-beda—Lempeng Indo-Australia bergerak relatif ke arah utara dan menyusup ke dalam Lempeng Eurasia[4][5], sementara Lempeng Pasifik bergerak relatif ke arah barat. Adanya kejadian tersebut sehingga menyebabkan kebutuhan akan bangunan tahan gempa atau perkuatan konstruksi bangunan merupakan satu dari sekian banyaknya solusi yang harus terpenuhi khususnya bangunan-bangunan yang berada di daerah rawan gempa serta bangunan yang memiliki lantai lebih dari 2 (dua) lantai. Selain masalah terkait masalah kualitas konstruksi bangunan, target kinerja yang tidak memenuhi persyaratan juga terjadi akibat gempa yang terjadi lebih dari satu kali. Seperti gempa utama dan gempa susulan, yang waktunya berdekatan dan dengan magnitudo yang relatif sama. Analisis terhadap banyak kasus pasca gempa menunjukkan bahwa risiko keruntuhan bangunan akibat kerusakan kumulatif gempa susulan harus dipertimbangkan[6]. Fenomena ini terjadi di Indonesia pada Gempa Bumi Mamuju tahun 2021, di mana kerusakan berat atau keruntuhan terjadi pada perkantoran, perumahan, dan bahkan rumah sakit setelah gempa susulan[7]. Isu terbaru terkait perkuatan struktur seringkali melibatkan berbagai aspek yang berkaitan dengan teknologi, regulasi, dan tantangan praktis. Dalam hal ini juga mempertimbangkan terkait evaluasi pengaruh perkuatan struktur yang digunakan seberapa efektif pada penambahan perkuatan struktur tersebut berdasarkan beban yang bekerja. Secara prinsip perkuatan struktur adalah proses teknis yang dirancang untuk meningkatkan kapasitas, kekuatan, atau stabilitas suatu struktur yang mungkin telah mengalami penurunan performa akibat peningkatan beban seperti beban gempa yang dimana menjadi konsentrasi mitigasi pada bangunan saat ini[8][9]. Konsep Isolasi dasar seismik merupakan salah satu teknik pengontrolan struktur yang efektif saat terjadi gempa, dimana konsep ini telah dikembangkan bertahun-tahun dan diterapkan oleh para engineer sebagai sistem bangunan yang efektif dalam meredam energi dari gempa tersebut[10].

Penelitian meneliti perilaku seismik dan permindahan sisa struktur selama[11] CS diselidiki, dan hasil numerik divalidasi dengan pengukuran lapangan[12]. Selain itu, analisis kerapuhan dilakukan untuk CS yang berbeda pada bangunan rumah sakit untuk menentukan kemungkinan kerusakan. Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa studi ini mengungkapkan bahwa kemungkinan kerusakan untuk bangunan yang terisolasi dasar yang terpapar gempa pada CS yang

berbeda. Kedepannya efek dari CS pada perilaku struktural dapat dipertimbangkan dengan mempertimbangkan efek pemanasan akibat oleh gesekan pada isolator selama gempa bumi. Hal ini dapat didukung dengan studi eksperimental yang akan dilakukan pada meja yang bergoyang. Selain itu, kemungkinan melebihi intensitas gempa tertentu tergantung pada CS tidak dipertimbangkan ketika mendapatkan kurva kerapuhan untuk CS dari struktur yang dipertimbangkan. Penelitian kedepannya harus memasukkan aspek untuk hasil yang lebih komprehensif dan akurat. Penting juga untuk memasukkan ketidakpastian estimasi dalam analisis kerapuhan yang dilakukan dengan catatan gempa yang terbatas dan mengeksplorasi dampaknya terhadap temuan. Analisis kerentanan seismik bangunan URM yang ada dalam konfigurasi FB dan BI, dengan mempertimbangkan LRB dan RR-FREI[13][14], serta ketidakpastian yang terkait dengan kapasitas bangunan dan permintaan seismik dengan kesimpulan hasil penelitian yaitu dimana analisis kerapuhan bangunan URM dengan resistansi rendah telah dipresentasikan untuk menilai efektivitas isolator dasar baru yang murah dalam mengurangi kerentanan gempa. Sebuah bangunan URM satu lantai dipilih sebagai tipologi bangunan yang representatif di negara berkembang. Dua sistem isolasi dasar yang berbeda dirancang untuk bangunan URM menggunakan RR-FREI dan LRB terhadap gempa maksimum yang dapat dipercaya, sesuai dengan standar India. Ketidakpastian hasil yang didapatkan terkait dengan kapasitas bangunan. Untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa” dengan menggunakan base isolation tipe High Damper Rubber Bearing Soft (HDS) dalam mereduksi gaya gempa gedung perpustakaan 5 lantai dan dibandingkan dengan struktur fixed base[15][16].

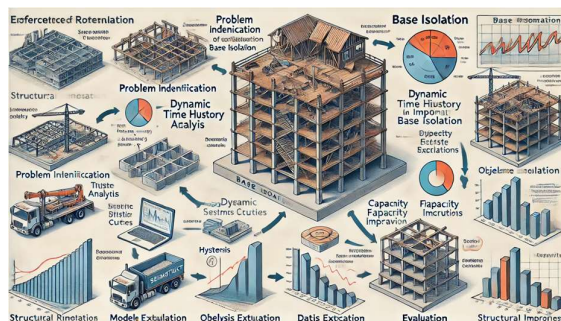
Pada penelitian ini akan menambahkan perkuatan struktur pada bangunan eksisting dengan menambahkan yaitu base isolation pada setiap kolom. Sistem penambahan base isolation adalah metode yang digunakan dalam rekayasa struktur untuk melindungi bangunan dari kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi[17]. Tujuannya adalah mengurangi transfer energi seismik dari tanah ke struktur bangunan, sehingga mengurangi dampak gempa pada bangunan tersebut. Sistem base isolation berfungsi dengan cara memisahkan bangunan dari getaran tanah yang disebabkan oleh gempa. Ini dicapai dengan memasang perangkat isolasi di antara fondasi dan struktur atas bangunan[18][19]. Perangkat isolasi biasanya berupa bantalan atau lapisan elastomerik (seperti karet) atau perangkat yang menggunakan pegas dan damper. Perangkat ini dirancang untuk menyerap dan meredam energi seismik. Dengan mengurangi

transfer energi dari tanah ke struktur bangunan, base isolation membantu mengurangi gaya yang bekerja pada struktur dan meningkatkan daya tahan bangunan terhadap kerusakan. Analisis akan dilakukan dengan memodelkan bangunan struktur tersebut dengan perangkat *software seismostruct*[20]. Untuk metode yang digunakan yaitu menggunakan *Dynamic Time History* yang dimana hasil dari pemodelan tersebut akan menghasilkan sebuah kurva hubungan antara simpangan antar segmen/ *Interstory Drift Ratio* (ISDR)[21][22]. Selain itu diperoleh kurva histerisis dan spektrum kapasitas yang bisa digunakan sebagai hasil data yang dimana akan menghasilkan sebuah kurva kerapuhan yang digunakan sebagai evaluasi pengaruh dari penambahan perkuatan struktur tersebut[23][24].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem *base isolation* dalam meningkatkan kinerja struktur bangunan eksisting terhadap beban gempa melalui analisis numerik menggunakan perangkat lunak *seismostruct* dan metode *Dynamic Time History*. Dengan menghasilkan parameter penting seperti *Interstory Drift Ratio* (ISDR), kurva histeris, dan spektrum kapasitas. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam menyediakan pendekatan mitigasi risiko gempa yang lebih efisien dan terukur, serta menyajikan kurva kerapuhan sebagai alat evaluasi kinerja bangunan setelah perkuatan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi praktis dalam implementasi teknologi *base isolation* untuk meningkatkan ketahanan bangunan di wilayah rawan gempa.

II. METODE PENELITIAN

Dalam merumuskan pada penelitian ini kami membuat kerangka berfikir sebagai berikut.



Gambar 1. Kerangka berfikir

1. Identifikasi Masalah

Mengidentifikasi isu struktural dan risiko seismik yang dapat mengurangi performa bangunan eksisting.

2. Perumusan Tujuan

Menentukan tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi efektivitas base isolation dalam meningkatkan ketahanan struktur.

3. Pengembangan Model

Membuat model struktur bangunan menggunakan perangkat lunak Seismostruct dengan memasukkan base isolation sebagai elemen desain.

4. Pelaksanaan Analisis

Melakukan analisis Dynamic Time History pada model struktur untuk mensimulasikan respons terhadap beban gempa.

5. Ekstraksi Data

Mengumpulkan hasil analisis berupa Interstory Drift Ratio (ISDR), kurva histerisis, dan spektrum kapasitas.

6. Evaluasi

Menyusun kurva kerapuhan (fragility curves) untuk mengevaluasi dampak penggunaan base isolation terhadap peningkatan performa struktur.

Objek penelitian

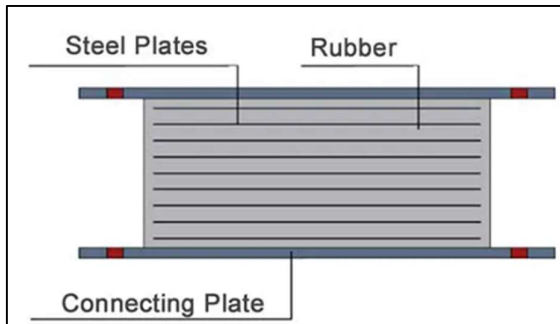
Bangunan yang digunakan sebagai analisa adalah bangunan sebuah kantor dua lantai yaitu salah satu bangunan fasilitas umum dari Bendung Karet Sungai Juana pati. Bangunan ini akan digunakan sebagai kantor pengelolaan dari operasi bendung karet yang dimana merupakan bangunan yang sangat penting dalam pengelolaan bendung karet yang difungsikan dalam mitigasi pada saat musim kemarau sebagai long storage keperluan irigasi dan pengendalian banjir. Sehingga dalam penilaian dan inovasi yang pada bangunan ini sangat penting dilakukan untuk mengetahui probabilitas kerusakan yang akan terjadi.



Gambar 2. Kantor Pengelola Bendung Karet

Material

Material sistem *base isolation* ini adalah menggunakan yang digunakan dalam analisis ini adalah Isolator elastomer, yang dapat memiliki redaman tinggi (HDRB) terdiri dari serangkaian lapisan horizontal bahan elastomer (karet sintetis atau alami) yang diselingi pelat baja[25]. Bantalan ini sangat kaku pada arah vertikal, mampu menahan beban vertikal yang tinggi dengan deformasi yang sangat kecil, namun fleksibel terhadap beban lateral pada kedua sumbu horizontal. Pelat baja memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kekakuan vertikal dan pengekangan lateral untuk mencegah deformasi lateral yang berlebihan, sekaligus membatasi penonjolan lateral karet. Parameter kunci untuk desain isolator elastomer adalah beban vertikal maksimum yang dapat ditahan, kekakuan horizontal, dan perpindahan horizontal relatif maksimum yang diizinkan antara kedua ujung bantalan.

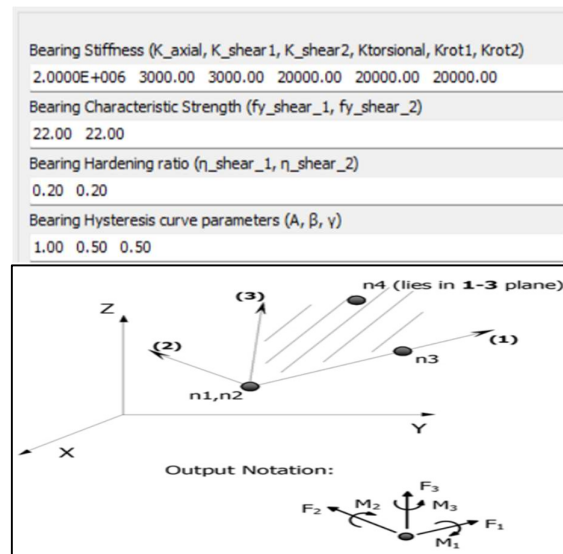


Gambar 3. Isolator elastomer

Isolasi seismik biasanya diterapkan pada kolom dan dinding tepat di atas permukaan pondasi. Jika bangunan memiliki ruang bawah tanah, pilihannya adalah memasang isolator di bagian atas, bawah, atau pertengahan kolom dan dinding ruang bawah tanah.

Propertis material

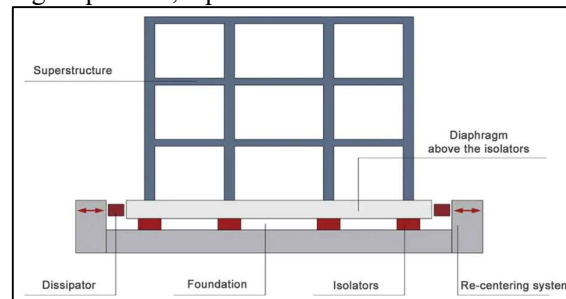
Dalam pemodelan ini menggunakan properti material seperti yang terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Propertis Material Isolator Elastomer

Penerapan

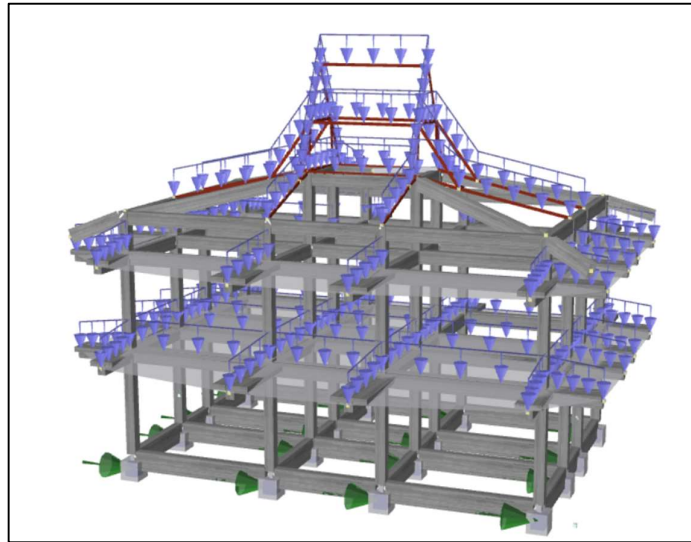
Dalam konfigurasi yang paling umum, diafragma dibangun tepat di atas isolator, untuk menghubungkan kolom dan mencegah getaran independennya selama peristiwa seismik besar. Seringkali diafragma serupa juga dibangun pada tingkat pondasi, tepat di bawah isolator.



Gambar 5. Sistem Isolator elastomer

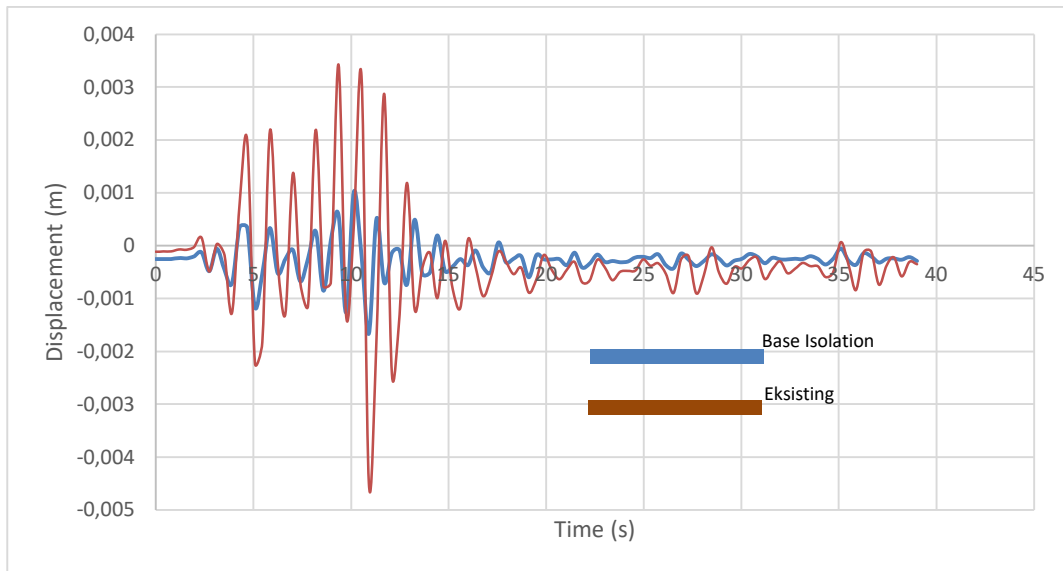
Pemodelan

Setelah menentukan material pada sistem isolator elastomer pada penelitian ini dilakukan pemodelan secara keseluruhan dengan membuat prototype bangunan tersebut pada software seismostruct. Dengan memberikan beberapa variasi beban kombinasi seperti beban hidup dan beban mati yang bervariasi pada masing-masing lantai sesuai fungsi ruangan dan memberikan beban dinamik dari time histori Gempa Kobe untuk memperlihatkan dari bangunan tersebut ketika menerima beban gempa bagaimana respon struktur tersebut[26].



Gambar 6. Pemodelan Kantor Pengelola Bendung Karet

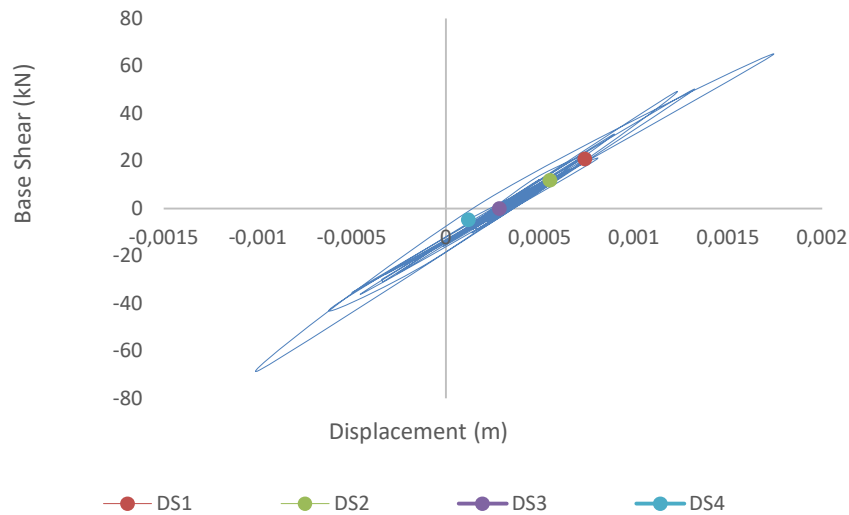
III. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 7. Kurva Respon Spektrum

Hasil dari kurva diatas memperlihatkan bahwa perbandingan antar bangunan yang tidak menggunakan sistem base isolation setelah diberikan beban dinamik perpindahan/ displacement dasar lebih kecil dibandingkan bangunan yang menggunakan podasi sistem base

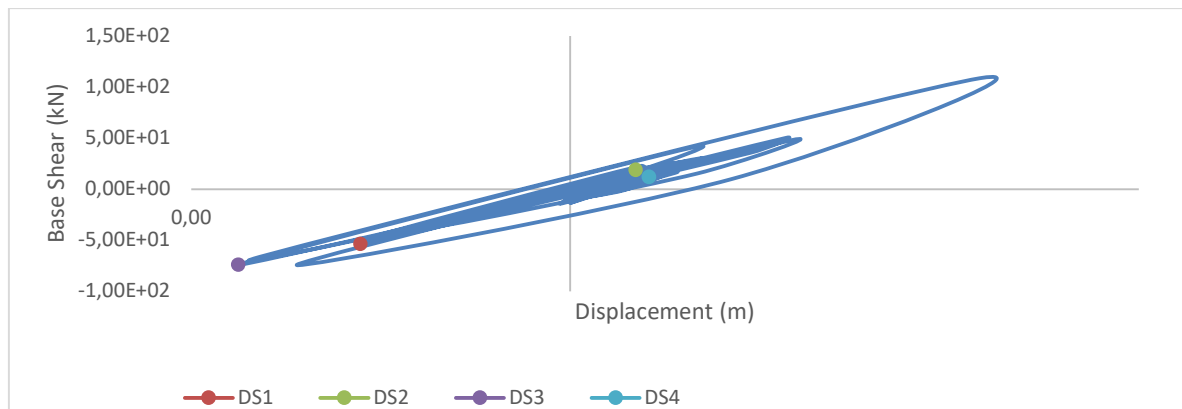
isolation lebih besar perpindahanya/ displacement dikarenakan dengan sistem base isolation pondasi tersebut elastis dan memberikan ijin perpindahan sebesar beban yang diijinkan sedangkan pada bangunan eksisting kaku/*rigid*.



Gambar 8. Kurva Histerisis Eksisting

Kurva histerisitik pada perilaku struktur eksisting *rigid* ini yang menunjukkan respons berbeda saat mengalami beban siklik, yaitu dengan beban

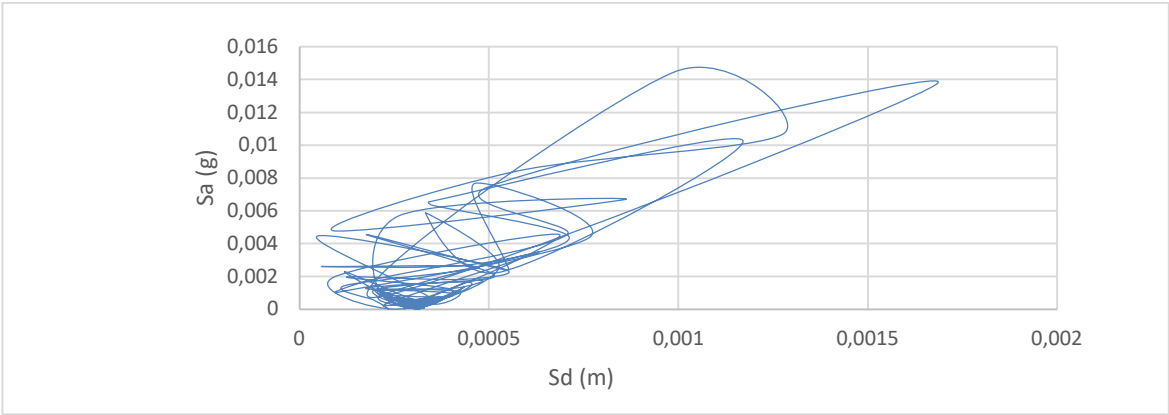
gempa kobe mengalami perpindahan 1,7 cm dengan kuat geser dasar 64.5 kN.



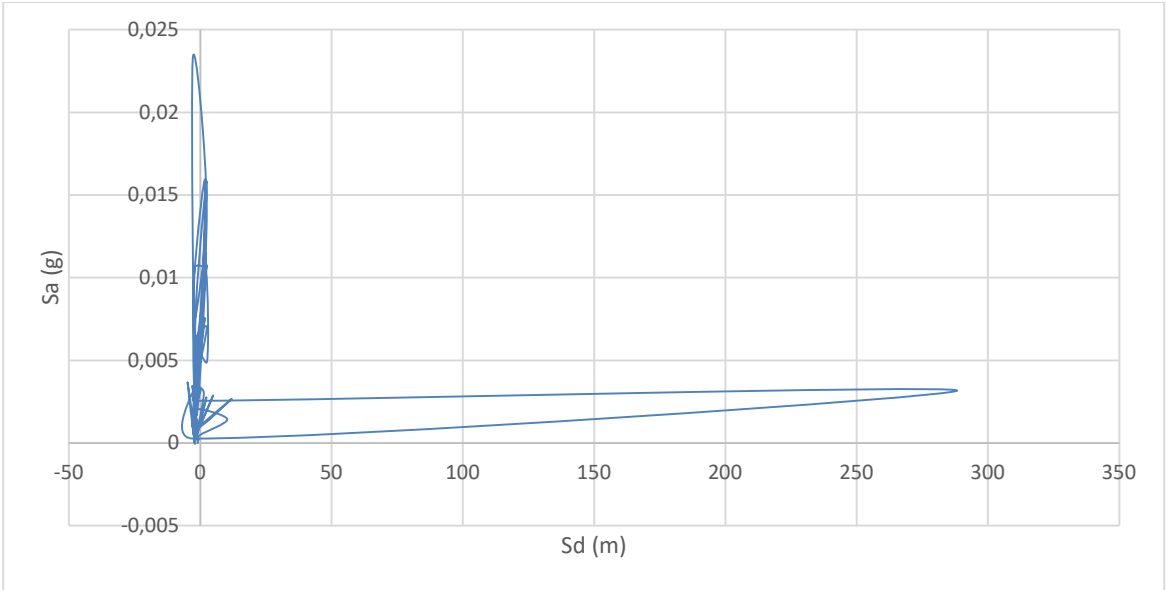
Gambar 9. Kurva Histerisis Base Isolation

Kurva histerisitik pada perilaku struktur dengan sistem *base isolation* ini yang menunjukkan respons berbeda saat mengalami beban siklik,

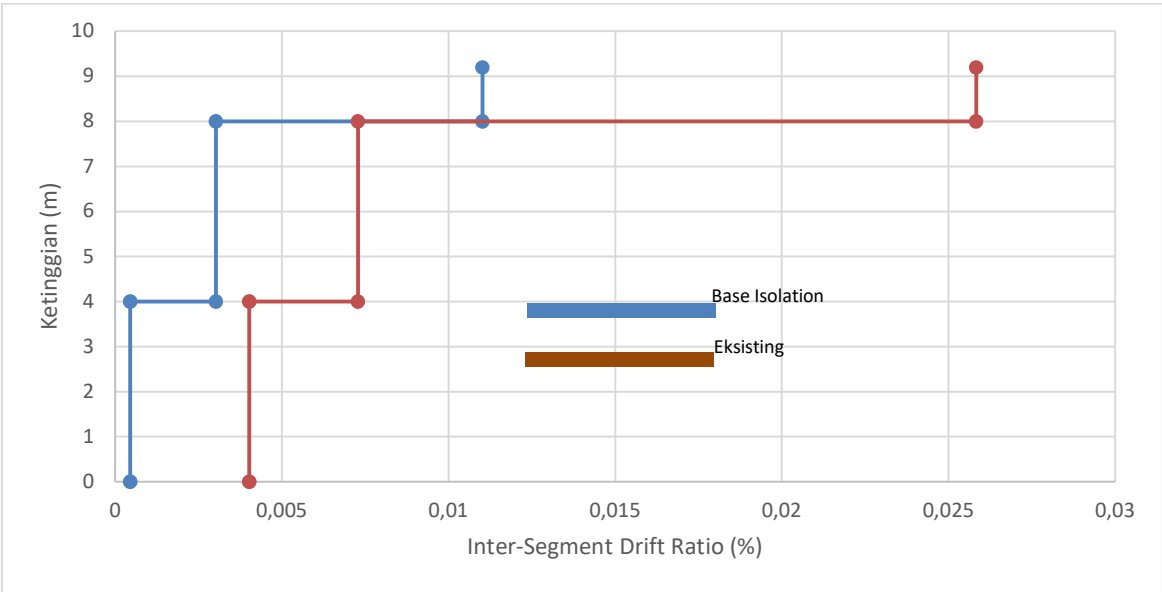
yaitu dengan beban gempa kobe mengalami perpindahan 4 cm dengan kuat geser dasar 108 kN.



Gambar 10. Kurva Spektrum Kapasitas Eksisting



Gambar 11. Kurva Spektrum Kapasitas Base Isolation



Gambar 12. Kurva Drift Ratio

Kurva kerapuhan Pada penelitian ini menggunakan dua metode yaitu HAZUS MH-MR5 dan metode Silva[27][28], digunakan untuk mengetahui pengaruh pembatasan kerusakan terhadap kinerja struktur. Metode Hazus MH-MR5 mengkategorikan batas kerusakan menjadi sedikit, sedang, luas, dan lengkap. Parameter analisis kerapuhan ditentukan menggunakan metode ini dengan spektrum perpindahan pada batas kerusakan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan metode yang diusulkan Silva, dkk., dijelaskan bahwa perpindahan atap maksimum digunakan untuk mengidentifikasi kondisi batas kerusakan bangunan dengan diklasifikasikan menjadi tiga keadaan batas 1 (DS1), keadaan batas 2 (DS2), dan keadaan batas 3 (DS3). Parameter analisis kerapuhan yang ditentukan oleh kedua metode ini adalah spektrum perpindahan dan batas kerusakan[29].

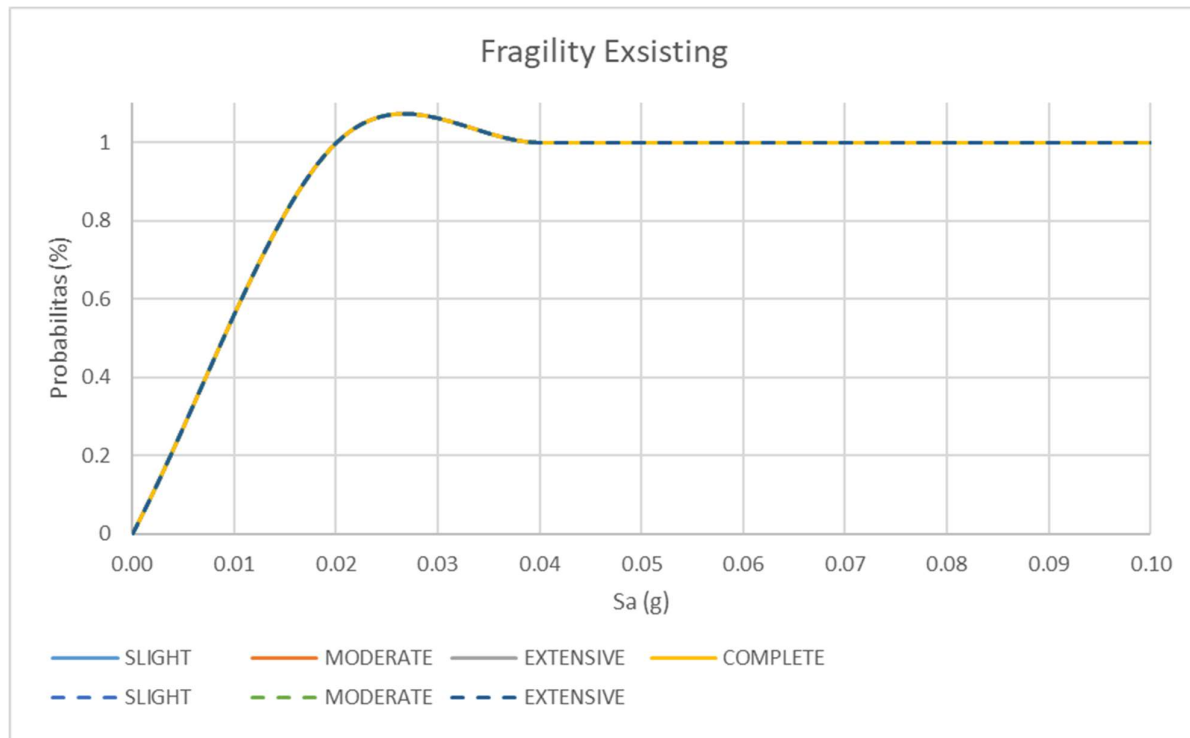
Tabel .1 *Damage State Based On Strain Level*

Limit State	Sd	β_{LS}	β_c	β_D	β_{Total}
	(g)				
Slight	0.0007	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476
Moderate	0.0005	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476
Extensive	0.0003	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476
Complete	0.0001	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476

Tabel. 2 *Damage State Based On Base Shear*

Damage State	Sd	β_{LS}	β_c	β_D	β_{Total}
	(g)				
DS1	1.1696	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481
DS2	-1.3299	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481
DS3	0.1080	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481

Dari pengolahan tabel ini maka diperoleh kurva kerapuhan struktur eksisting dari masing-masing parameter yang dimana pada Tabel 1 menggunakan batas kerusakan berdasarkan batas regangan sedangkan pada Tabel 2 menggunakan batas kerusakan dengan meninjau berdasarkan maksimum kuat geser dasar.



Gambar 11. Kurva Kerapuhan Eksisting

Dari kurva diatas memperlihatkan bahwa pada tahap akselerasi beban gempa pada percepatan 0.02 g struktur eksisting pada tahap kerusakan

ringan sampai dengan runtuh mengalami probabilitas 100%.

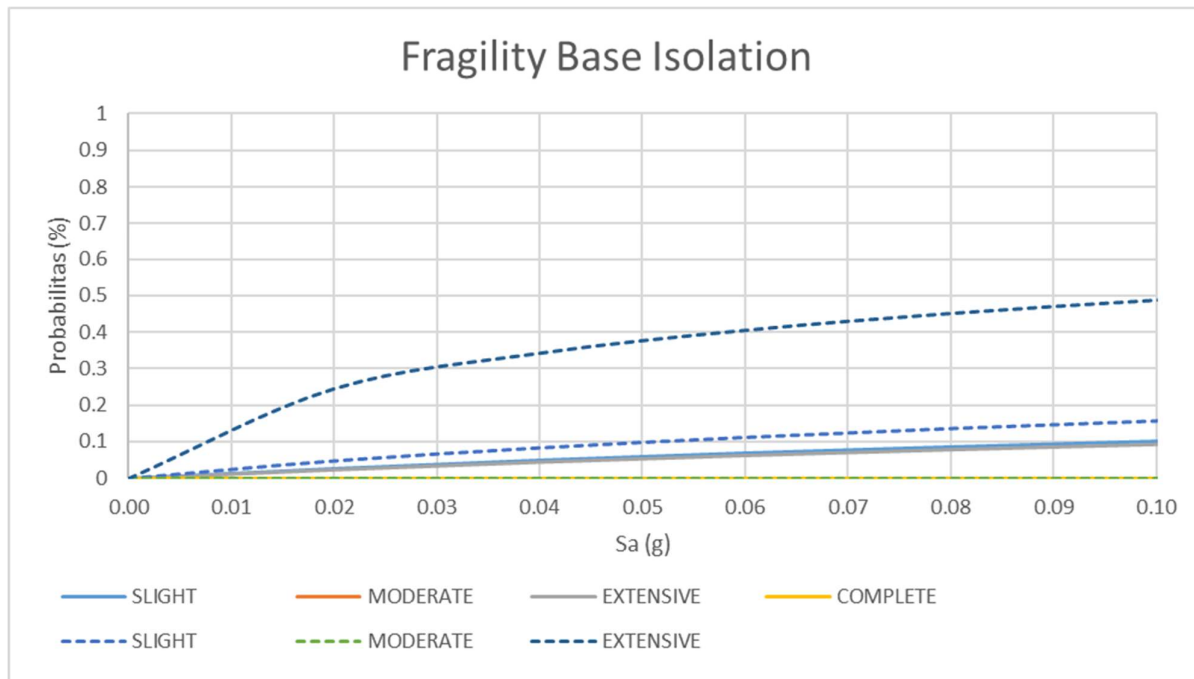
Tabel .3 *Damage State Based On Strain Level*

Limit State	Sd	β_{LS}	β_C	β_D	β_{Total}
	(g)				
Slight	2.2506	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481
Moderate	-	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481
Extensive	2.5353	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481
Complete	-	0.4000	2.3729	0.4500	2.4481

Tabel. 4 *Damage State Based On Base Shear*

Damage State	Sd	β_{LS}	β_C	β_D	β_{Total}
	(g)				
DS1	0.0005	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476
DS2	0.0001	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476
DS3	0.0002	0.4000	0.5966	0.4500	0.8476

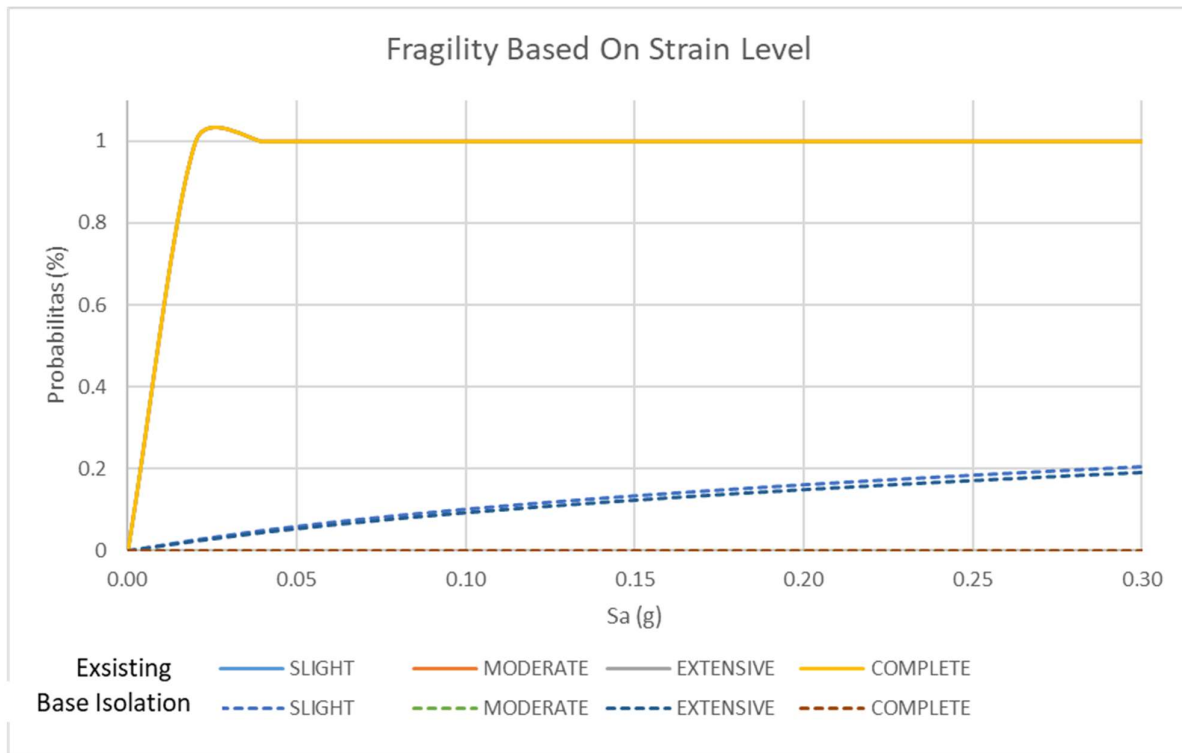
Dari pengolahan tabel ini maka diperoleh kurva kerapuhan struktur dengan sistem base isolation dari masing-masing parameter yang dimana pada Tabel 1 menggunakan batas kerusakan berdasarkan batas regangan sedangkan pada Tabel 2 menggunakan batas kerusakan dengan meninjau berdasarkan maksimum kuat geser dasar.



Gambar 12. Kurva Kerapuhan Base Isolation

Dari kurva diatas memperlihatkan bahwa pada tahap akselerasi beban gempa pada percepatan 0.1 g struktur dengan sistem base isolation pada tahap kerusakan ringan 48% pada tahap kerusakan

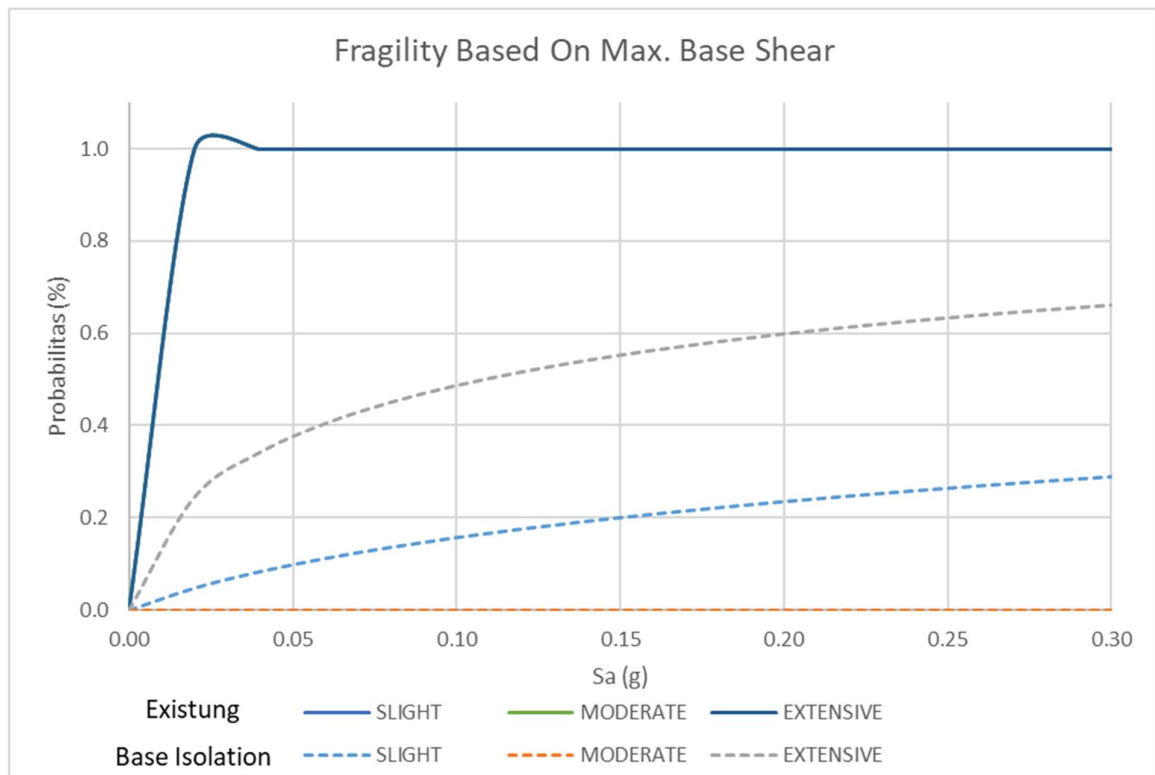
sedang dengan beban ini memiliki probabilitas 15% sedangkan kerusakan berat maupun potensi runtuh tidak ada probabilitas pada struktur dengan sistem base isolation ini.



Gambar 13. Perbandingan Kurva Kerapuhan Berdasarkan Strain Level

Kurva perbandingan berdasarkan *strain level* ini menunjukkan bahwa sistem strukur dengan sistem *base isolation* menunjukkan penurunan yang

signifikan terhadap probabilitas kerusakan pada struktur gedung pengelola bendung karet yaitu sebesar 70 % pada kerusakan ringan dan sedang.



Gambar 14. Perbandingan Kurva Kerapuhan Berdasarkan Maksimum Base Shear

Kurva perbandingan berdasarkan maksimum *base shear* ini menunjukkan bahwa sistem strukur dengan sistem *base isolation* menunjukkan penurunan yang signifikan terhadap probabilitas kerusakan pada struktur gedung pengelola bendung karet yaitu sebesar 70 % kerusakan ringan dan 40 % pada kerusakan sedang.

IV. KESIMPULAN

Hasil dari pembahasan diatas dapat disimpulkan yaitu:

1. Dengan pondasi sistem *base isolation* terjadi perpindahan dasar lantai 1 cukup besar dibandingkan pada bangunan dengan pondasi sistem kaku/ rigid sehingga memerlukan space pada bangunan ini untuk mengalami perpindahan.
2. Dengan adanya penambahan sistem *base isolation* pada pondasi dapat mengurangi terjadinya simpangan antar segmen/ *Interstory Drift Ratio* (ISDR) sebesar 44%.
3. Hasil dari kurva kerapuhan menunjukkan bahwa dengan struktur sistem pondasi *base isolation* probabilitas kerusakan mengalami penurunan sebesar 70% pada kerusakan ringan berdasarkan *strain level* dan maksimum *base shear*. Sedangkan kerusakan sedang mengalami penurunan 40% berdasarkan maksimum *base shear*

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Tuhan yang Maha Esa yang telah memberikan kelancaran serta kekuatan dalam penyelesaian pada penelitian ini serta kepada team peneliti Universitas Linggabuana PGRI Sukabumi yang telah memberikan kontribusi banyak pada penelitian ini semoga bisa bermanfaat untuk semua masyarakat maupun para praktisi dan akademis.

REFERENSI

- [1] K. S. Pribadi *et al.*, "Learning from past earthquake disasters: The need for knowledge management system to enhance infrastructure resilience in Indonesia," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 64, hal. 102424, Okt 2021, doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102424.
- [2] R. J. Stern, "The evolution of plate tectonics," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 376, no. 2132, hal. 20170406, Nov 2018, doi: 10.1098/rsta.2017.0406.
- [3] C. Doglioni dan G. Panza, "Polarized Plate Tectonics," 2015, hal. 1–167. doi:

- 10.1016/bs.agph.2014.12.001.
- [4] I. P. Pudja, "Focal validation mechanism for Lombok earthquake with image analysis of satellite radar and crust movement GPS observation," *Sustinere J. Environ. Sustain.*, vol. 4, no. 1, hal. 24–32, Apr 2020, doi: 10.22515/sustinere.jes.v4i1.92.
- [5] T. Raimondo, M. Hand, dan W. J. Collins, "Compressional intracontinental orogens: Ancient and modern perspectives," *Earth-Science Rev.*, vol. 130, hal. 128–153, Mar 2014, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.11.009.
- [6] G. Liek Yeo dan C. Allin Cornell, "Building life-cycle cost analysis due to mainshock and aftershock occurrences," *Struct. Saf.*, vol. 31, no. 5, hal. 396–408, Sep 2009, doi: 10.1016/j.strusafe.2009.01.002.
- [7] P. Supendi *et al.*, "Foreshock–mainshock–aftershock sequence analysis of the 14 January 2021 (Mw 6.2) Mamuju–Majene (West Sulawesi, Indonesia) earthquake," *Earth, Planets Sp.*, vol. 73, no. 1, hal. 106, Des 2021, doi: 10.1186/s40623-021-01436-x.
- [8] X.-Y. Cao, D. Shen, D.-C. Feng, C.-L. Wang, Z. Qu, dan G. Wu, "Seismic retrofitting of existing frame buildings through externally attached sub-structures: State of the art review and future perspectives," *J. Build. Eng.*, vol. 57, hal. 104904, Okt 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104904.
- [9] V. Pertile, A. Stella, L. De Stefani, dan R. Scotta, "Seismic and Energy Integrated Retrofitting of Existing Buildings with an Innovative ICF-Based System: Design Principles and Case Studies," *Sustainability*, vol. 13, no. 16, hal. 9363, Agu 2021, doi: 10.3390/su13169363.
- [10] D. De Domenico dan G. Ricciardi, "Earthquake-resilient design of base-isolated buildings with TMD at basement: Application to a case study," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 113, hal. 503–521, Okt 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.06.022.
- [11] S. Wu, J. Li, X. Chen, dan Z. Guan, "Seismic residual displacement for a structural system with partial self-centering ability," *J. Build. Eng.*, vol. 95, hal. 110123, Okt 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.110123.
- [12] S. Amiri dan E. Bojórquez, "Residual displacement ratios of structures under mainshock-aftershock sequences," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 121, hal. 179–193, Jun 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.03.021.
- [13] D. Losanno, N. Ravichandran, dan F. Parisi, "Seismic fragility of base-isolated single-story unreinforced masonry buildings equipped with classical and recycled rubber bearings in Himalayan regions," *J. Build. Eng.*, vol. 45, hal. 103648, Jan 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103648.
- [14] D. Losanno, N. Ravichandran, dan F. Parisi, "Seismic fragility models for base-isolated unreinforced masonry buildings with fibre-

- reinforced elastomeric isolators,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 52, no. 2, hal. 308–334, Feb 2023, doi: 10.1002/eqe.3761.
- [15] M. S. Yavas, Z. Gao, N. Mekaoui, dan T. Saito, “A machine learning-based hybrid seismic analysis of a lead rubber bearing isolated building specimen,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 174, hal. 108217, Nov 2023, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108217.
- [16] J. C. De la Llera, C. Lüders, P. Leigh, dan H. Sady, “Analysis, testing, and implementation of seismic isolation of buildings in Chile,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 33, no. 5, hal. 543–574, Apr 2004, doi: 10.1002/eqe.360.
- [17] F. Mazza, M. Mazza, dan A. Vulcano, “Base-isolation systems for the seismic retrofitting of r.c. framed buildings with soft-storey subjected to near-fault earthquakes,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 109, hal. 209–221, Jun 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.02.025.
- [18] A. De Luca dan L. G. Guidi, “State of art in the worldwide evolution of base isolation design,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 125, hal. 105722, Okt 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105722.
- [19] V. Lupășteanu, L. Soveja, R. Lupășteanu, dan C. Chingălată, “Installation of a base isolation system made of friction pendulum sliding isolators in a historic masonry orthodox church,” *Eng. Struct.*, vol. 188, hal. 369–381, Jun 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.040.
- [20] K. K. Kuria dan O. K. Kegyes-Brassai, “Nonlinear Static Analysis for Seismic Evaluation of Existing RC Hospital Building,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 21, hal. 11626, Okt 2023, doi: 10.3390/app132111626.
- [21] L. Tian, H. Pan, dan R. Ma, “Probabilistic seismic demand model and fragility analysis of transmission tower subjected to near-field ground motions,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 156, hal. 266–275, Mei 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.02.011.
- [22] H. Pan, L. Tian, X. Fu, dan H. Li, “Sensitivities of the seismic response and fragility estimate of a transmission tower to structural and ground motion uncertainties,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 167, hal. 105941, Apr 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105941.
- [23] C. Petridis dan D. Pitilakis, “Fragility curve modifiers for reinforced concrete dual buildings, including nonlinear site effects and soil–structure interaction,” *Earthq. Spectra*, vol. 36, no. 4, hal. 1930–1951, Nov 2020, doi: 10.1177/8755293020919430.
- [24] B. Xu, X. Wang, C.-S. W. Yang, dan Y. Li, “Probabilistic curvature limit states of corroded circular RC bridge columns: Data-driven models and application to lifetime seismic fragility analyses,” *Earthq. Spectra*, vol. 40, no. 4, hal. 2805–2835, Nov 2024, doi: 10.1177/87552930241255091.
- [25] G. Pianese, N. Van Engelen, H. Toopchi-Nezhad, dan G. Milani, “High-damping fiber-reinforced elastomeric seismic isolator in different boundary conditions: An experimental insight,” *Eng. Struct.*, vol. 300, hal. 117199, Feb 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117199.
- [26] A. Yusra, A. Mustafa, M. Refiyanni, dan Z. Zakia, “Performance Structural Analysis of U2C Building with the Kobe Earthquake Spectrum,” *Int. J. Eng. Sci. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 1, hal. 36–46, Feb 2023, doi: 10.52088/ijesty.v3i1.413.
- [27] S. Wanto, S. Sangadji, dan H. A. Saifullah, “Seismic retrofitting of existing steel structures with X-bracing,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2482, no. February, 2023, doi: 10.1063/5.0112776.
- [28] M. Rahma, S. Sangadji, Z. F. Virawan, H. A. Saifullah, dan R. H. Devi, “Evaluating Retrofitting Strategies of Low-to-Mid-Rise Reinforced Concrete Structure Based on Its Seismic Fragility,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.2.17480.
- [29] P. P. Sumedi, S. Sangadji, dan H. A. Saifullah, “The fragility curve of low-to-mid-rise steel frame buildings retrofitted with inverted V-bracing,” in *AIP Conference Proceedings*, 2023, doi: 10.1063/5.0128995.