

Model Validasi dan Evaluasi Kinerja Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator (GFREI) Pada Struktur Portal Sederhana Menggunakan Opensees

Jessica Natalia Cristanti, Yoyong Arfiadi

Universitas Atma Jaya, Indonesia

Email: 235119713@students.uajy.ac.id, yoyong.ar@uajy.ac.id

Abstrak:

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi gaya kepemimpinan supervisor di lapangan berdasarkan penilaian tukang batu, tukang kayu dan tukang besi di Yogyakarta, Semarang, Bandung, dan Jabotabek. Penelitian ini juga melakukan kajian mengenai hubungan antara para tukang dengan supervisor di lapangan. Faktor-faktor untuk hubungan tersebut adalah partisipasi, dukungan, achievement oriented, objektivitas, fasilitas bekerja dan kepribadian supervisor terhadap para tukang di lapangan. Penelitian ini mengadopsi instrumen studi kepemimpinan yang dilakukan Universitas Iowa dan juga mempergunakan Teori Kontigensi Fiedler. Pengumpulan data dilakukan dengan menyebarkan kuesioner, wawancara dan observasi. Responden yang berhasil dijangkau sejumlah 109 yang terdiri dari 18 supervisor, 36 tukang batu, 33 tukang kayu dan 22 tukang besi. Faktor-faktor mengenai hubungan antara supervisor dan para tukang dianalisis dengan menggunakan reliability, hasilnya menunjukkan bahwa faktor dukungan, faktor kepribadian, faktor achievement oriented dan faktor fasilitas bekerja reliable. Hasil konkordansi Kendall menunjukkan urutan faktor tersebut mulai dari yang pertama adalah faktor dukungan, faktor partisipasi, faktor kepribadian, faktor objektivitas, faktor achievement oriented dan faktor fasilitas bekerja.

Kata kunci: gaya kepemimpinan, konstruksi, teori Fiedler

Abstract:

This research aims at indentifying leadership style of supervisors in project construction. The leadership was explored using structured questionnaire through bricklayers, carpenters and steelfixers in Yogyakarta, Semarang, Bandung and Jabotabek. The study also analysed factors influencing relationship between supervisor and craftsmen. The factors are participation, support, achievement oriented, abjectivity, work facility and personality of supervisor. The instrument of leadership style rated by craftment was adopted from Iowa University, whilst the instrument rated by supervisors themselves utilised Contingency Fiedler Theory. The study successfully obtained 109 respondents (18 supervisor, 36 bricklayer, 33 carpenters and 22 steelfixers). The factors of relationship between supervisor and craftsmen are tested using reliability analysis. Results show that factor support, personality, achievement oriented and work facility are reliable. Furthermore, the factors were ranked using Kendall concordance analysis. Results show that the ranking of the factors are: support (1th), participation (2nd), personality (3th), objectivity (4th), achivement oriented (5th) and work facility (6th).

Keywords: leadership style, construction, Fiedler theory.

Corresponding: Jessica Natalia Cristanti

E-mail: 235119713@students.uajy.ac.id



PENDAHULUAN

Indonesia berada di zona pertemuan empat lempeng tektonik utama Eurasia, Indo-Australia, Filipina, dan Pasifik yang menjadikannya salah satu wilayah paling rawan gempa di dunia. Data BMKG mencatat rata-rata lebih dari 5.000 gempa berkekuatan di atas 3,0 skala Richter terjadi setiap tahun. Tragedi gempa besar seperti Aceh (2004), Yogyakarta (2006), Padang (2009), hingga Lombok dan Palu (2018) telah membuktikan betapa rentannya

infrastruktur terhadap dampak seismik, baik dari segi kerusakan fisik maupun korban jiwa (Faridzi et al., 2024; Fitriyani et al., 2021; Rahmawati et al., 2020).

Perkembangan rekayasa struktur tahan gempa kini bergeser dari konsep konvensional berbasis daktilitas menuju pendekatan berbasis kinerja. Salah satu inovasi yang dianggap efektif adalah sistem isolasi dasar (*base isolation*), teknologi yang memisahkan struktur bangunan dari getaran tanah untuk meminimalkan transfer energi gempa ke struktur atas (Mahmud et al., 2023; Nurjaman, 2020; Prakosa & Wibowo, 2018; Utomo & Soegiarso, 2021; Yurisman et al., 2022). Prinsip ini telah dibuktikan melalui berbagai studi, termasuk oleh Kelly dan Konstantinidis pada 2011. Di antara jenis isolator yang umum digunakan, elastomeric isolator berbahan karet seperti *High Damping Rubber Bearing* (HDRB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB) telah diaplikasikan secara global. Namun, kedua sistem ini memiliki beberapa kendala teknis: bobot yang besar antara lain proses instalasi yang rumit, biaya produksi tinggi, serta kesulitan adaptasi pada bangunan berlantai rendah dengan beban ringan (Al-Anany et al., 2018; Ehsani & Toopchi-Nezhad, 2017; Prakash & Jangid, 2024a, 2024b; Toopchi-Nezhad et al., 2009).

Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator (GFREI) muncul sebagai solusi inovatif dengan mengganti pelat baja tradisional pada isolator konvensional dengan lapisan fiber glass. Material ini menawarkan keunggulan signifikan: massa GFREI hanya seperempat isolator biasa, biaya produksi lebih efisien, proses manufaktur sederhana, serta ketahanan korosi yang lebih baik (Habieb et al., 2022; Kelly & Takhirov, 2001; Marsico et al., 2020; Pianese et al., 2024; Rofiq et al., 2022a; Tavio & Wijaya, 2020a). Potensi ini menjadikan GFREI kandidat ideal untuk aplikasi di wilayah tropis seperti Indonesia.

Studi eksperimental oleh (de Raaf et al., 2011) mengungkapkan perilaku unik GFREI pada deformasi besar, termasuk fenomena roll-over yang perlu diantisipasi dalam desain. Di tingkat lokal, penelitian (Tavio & Wijaya, 2020b) terhadap prototipe GFREI buatan Indonesia menunjukkan kapasitas deformasi lateral dan karakteristik histeretik yang memadai untuk aplikasi praktis. Meskipun uji eksperimen telah banyak dilakukan, pemodelan numerik GFREI masih perlu pengembangan lebih lanjut. (Rofiq et al., 2022b) telah memulai eksplorasi menggunakan software Abaqus dengan metode FEM, namun pemanfaatan platform *open-source* seperti OpenSees yang dikembangkan PEER untuk simulasi rekayasa gempa masih jarang dieksplorasi. Padahal, fleksibilitas dan sifat *open-source* OpenSees memungkinkan penyesuaian model sesuai kebutuhan spesifik, sekaligus mendukung prinsip desain berbasis kinerja (Lu et al., 2016; McKenna et al., 2016; Radu, 2017; Wang et al., 2017; Wang & Mahin, 2018).

Persoalan mendesak di Indonesia terletak pada kerentanan bangunan berlantai rendah seperti rumah tinggal, sekolah, dan fasilitas publik yang sering menjadi korban utama gempa. Teknologi isolasi dasar konvensional kerap tidak ekonomis untuk struktur sederhana ini, sehingga GFREI dengan karakteristiknya yang ringkas dan terjangkau diharapkan bisa menjadi jawaban strategis. Berdasarkan tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model numerik GFREI di OpenSees dengan mengacu data eksperimen (Tavio & Wijaya, 2020b).

Melalui pengembangan model tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan formulasi numerik yang akurat dan efisien dalam mensimulasikan respons struktur terhadap beban gempa, khususnya untuk konstruksi sederhana yang membutuhkan solusi ekonomis. Manfaat penelitian ini adalah memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang rekayasa struktur tahan gempa dengan memperluas pemahaman tentang performa GFREI, menyediakan dasar

perancangan isolator yang lebih terjangkau dan mudah diterapkan di bangunan non-infrastruktur besar, serta mendukung mitigasi risiko gempa di Indonesia melalui penerapan teknologi isolasi dasar yang inovatif dan adaptif terhadap kebutuhan lokal.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian rekayasa numerik (computational engineering research) dengan pendekatan analytical–simulation based. Langkah awal dalam penelitian ini diawali dengan melakukan kajian literatur secara mendalam terhadap berbagai publikasi ilmiah dan hasil penelitian terdahulu dalam bidang rekayasa struktur, khususnya yang berkaitan dengan sistem isolasi seismik dan pemodelan numerik. Kajian dilakukan terhadap jurnal-jurnal nasional maupun internasional yang membahas topik isolator elastomerik, perilaku histeresis material, serta implementasi perangkat lunak simulasi seperti OpenSees dalam analisis struktur tahan gempa.

Melalui tinjauan pustaka ini, peneliti menemukan bahwa penelitian mengenai Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator (GFREI) masih tergolong terbatas, khususnya dalam konteks pemodelan numerik menggunakan *platform open-source* seperti OpenSees. Sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada analisis eksperimental atau simulasi menggunakan perangkat lunak komersial berbasis FEM seperti Abaqus. Selain itu, meskipun studi eksperimental terhadap GFREI (misalnya oleh Tavio dan Wijaya, 2020) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih terdapat *research gap* dalam hal validasi numerik berbasis kurva histeresis dan respons dinamis pada struktur yang dilengkapi GFREI.

Berdasarkan identifikasi gap tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengembangkan model numerik GFREI dalam OpenSees berdasarkan data eksperimen aktual, kemudian memvalidasi kurva histeresis dan menganalisis pengaruh parameter isolator terhadap respons struktur portal akibat beban gempa. Pemilihan OpenSees sebagai platform pemodelan didasarkan pada fleksibilitas dan sifat terbuka (*open-source*) yang memungkinkan kustomisasi elemen material dan kontrol penuh terhadap proses analisis numerik. Perilaku struktural yang dikaji meliputi hubungan gaya-perpindahan (*force-displacement*), hubungan percepatan terhadap waktu (*acceleration-time*), serta reduksi *base shear* sebagai indikator kinerja isolasi seismik.

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan pemodelan numerik GFREI di Indonesia sekaligus mendukung penerapan teknologi isolasi dasar yang ekonomis dan aplikatif untuk bangunan berlantai rendah.

Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan pendekatan studi literatur, pemodelan, validasi, serta analisis seperti yang tampak pada Gambar 1 dibawah ini. Langkah-langkah alur penelitian dapat dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi model isolator GFREI (*Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator*) dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak OpenSees terhadap data hasil eksperimen dari literatur. Tujuan dari validasi ini adalah untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan perilaku histeretik isolator secara akurat. Tahap verifikasi dalam penelitian ini dirancang untuk mengkonfirmasi ketepatan model numerik *Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator* (GFREI) yang telah dibangun menggunakan platform OpenSees. Proses verifikasi dilaksanakan melalui perbandingan sistematis antara parameter-parameter fundamental yang diperoleh dari simulasi numerik dengan nilai rujukan yang tersedia dalam literatur ilmiah, khususnya mengacu pada karya pengujian eksperimental laboratorium Sriatmaja & Wijaya (2020).

Parameter yang dianalisis meliputi gaya maksimum (F_{maks}), gaya minimum (F_{min}), simpangan maksimum (Δ_{maks}), simpangan minimum (Δ_{min}), kekakuan efektif (K_{eff}), serta rasio redaman efektif. Data hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan data referensi yang tersedia dalam publikasi sebelumnya. Strategi verifikasi ini secara khusus menitikberatkan pada evaluasi parameter-parameter dinamis fundamental, meliputi kekakuan efektif (K_{eff}), koefisien redaman efektif (ζ), dan karakteristik perilaku kurva histeresis. Pemilihan fokus pada parameter-parameter tersebut didasarkan pada pertimbangan praktis bahwa nilai-nilai ini dapat diekstraksi secara langsung dari output simulasi numerik tanpa memerlukan ketergantungan pada data properti material awal yang seringkali tidak tersedia dengan tingkat kepastian yang memadai dalam penelitian eksperimental.

Hasil Simulasi dan Perbandingan dengan Referensi Data

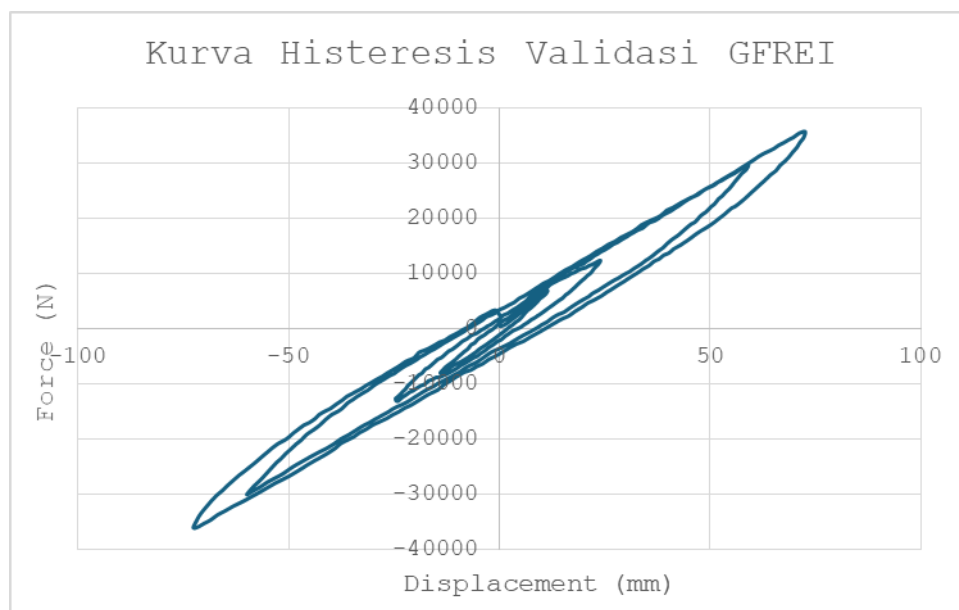
Tabel berikut menunjukkan hasil simulasi yang diperoleh dari OpenSees, penyimpangan atau deviasi terhadap nilai referensi, serta pembulatan untuk keperluan pelaporan.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Simulasi dan Data *Paper*

No.	Parameter	Hasil Simulasi	<i>Paper</i>	Deviasi (%)
1.	Gaya maksimum (Fmax)	32.321 N	-	-
2.	Gaya minimum (Fmin)	-32.000 N	-	-
3.	Simpangan maksimum (Δ_{max})	72.514 mm	-	-
4.	Simpangan minimum (Δ_{min})	-70.0155 mm	-	-
5.	Kekakuan efektif (Keff)	3,920 N/mm	4,045 N/mm	3,09%
7.	Redaman efektif	5,15%	4,08%	5,15%

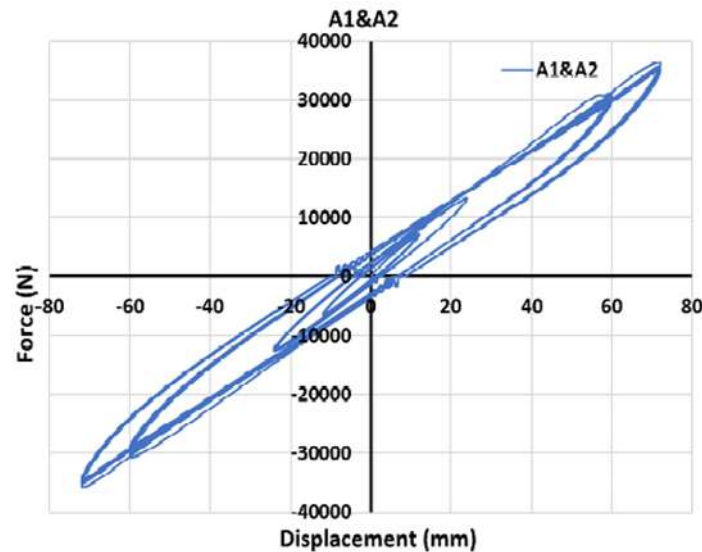
sumber: data olahan

Berikut juga disertakan gambar hasil kurva histeretik dari simulasi numerik menggunakan platform OpenSees dan kurva hasil pengujian Sriatmaja & Wijaya (2020).



Gambar 2. Kurva Histeresis Validasi GFREI

sumber: data olahan



Gambar 3. Kurva Histeresis Eksperimental GFREI
sumber: data olahan

Analisis Kurva Histeresis

Kurva histeresis berfungsi sebagai visualisasi grafis yang menggambarkan korelasi antara magnitude gaya dan besarnya perpindahan pada komponen isolator ketika mengalami pembebanan siklik. Dalam konteks simulasi menggunakan OpenSees, data untuk konstruksi kurva histeresis diperoleh melalui proses perekaman sistematis terhadap gaya internal yang berkembang dan perpindahan nodal yang terjadi pada elemen zeroLength yang secara spesifik diimplementasikan untuk merepresentasikan karakteristik perilaku GFREI.

Hasil analisis simulasi mengungkapkan bahwa profil kurva histeresis yang terbentuk menampilkan konfigurasi loop yang relatif simetris dengan kecenderungan ekspansi yang progresif pada siklus-siklus pembebanan berikutnya. Fenomena ini secara jelas mengindikasikan keberadaan karakteristik perilaku nonlinier yang inherent serta efek disipasi energi yang merupakan ciri khas dari sistem isolator elastomerik. Temuan ini memberikan konfirmasi bahwa konstruksi model numerik telah berhasil menangkap esensi respons dinamis dari GFREI, termasuk manifestasi efek pelunakan material (*softening effect*) yang timbul sebagai konsekuensi dari deformasi berulang.

a. Evaluasi Gaya Maksimum dan Minimum

Menurut hasil simulasi yang diperoleh dari OpenSEES, gaya maksimum yang tercatat adalah 32.321 N, sedangkan gaya minimum yang dilaporkan Adalah 32.000 N. Angka ini diperoleh dari puncak kurva histeresis selama siklus beban paling substansial, yang menandakan respons maksimum isolator GFREI terhadap gaya lateral yang diterapkan.

Jika dibandingkan dengan kurva eksperimental yang disajikan oleh Sariatmaja & Wijaya (2020), morfologi pola kurva histeresis yang terlihat dalam hasil simulasi menunjukkan kemiripan tren, khususnya kemiringan kurva dan gaya puncak yang relatif sebanding yang jatuh dalam kisaran $\pm 32000 - 36000$ N.

b. Evaluasi Simpangan Maksimum dan Minimum

Hasil yang diperoleh dari simulasi menunjukkan deviasi maksimum 72.514 mm dan deviasi minimum -70.0155 mm. Metrik ini menandakan deformasi lateral paling signifikan

yang terjadi pada puncak siklus pemuatan. Menurut kurva eksperimental, deviasi maksimum yang tercatat berada dalam kisaran $\pm 72\text{--}75$ mm, sehingga menggambarkan bahwa perbedaan antara temuan simulasi dan eksperimental sangat minimal (sekitar $< 4\%$).

c. Analisis Kekakuan Efektif (K_{eff})

Kalkulasi kekakuan efektif dilaksanakan berdasarkan identifikasi nilai puncak gaya dan perpindahan dari siklus pembebanan utama yang representatif, dengan mengaplikasikan formulasi matematis yang telah terstandardisasi dalam praktik rekayasa gempa. Perhitungan nilai kekakuan efektif berdasarkan jurnal dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini

$$K_{\text{eff}} = \frac{(F_{\text{max}} - F_{\text{min}})}{(d_{\text{max}} - d_{\text{min}})}$$

Metodologi perhitungan ini mengikuti prosedur yang telah ditetapkan dalam standar internasional untuk evaluasi kinerja isolator seismik.

Dalam konteks penelitian ini, dataset yang digunakan untuk kalkulasi merupakan hasil langsung dari simulasi OpenSees, dengan pencatatan bahwa gaya maksimum dan minimum yang tercatat masing masing mencapai magnitude 35.804,3 N dan -35.974,1 N. Sementara itu, perpindahan maksimum dan minimum yang terukur masing-masing bernilai 72,30 mm dan -72,30 mm. Berdasarkan aplikasi rumus perhitungan kekakuan efektif terhadap data-data tersebut, diperoleh nilai K_{eff} yang dapat dijadikan sebagai parameter karakteristik fundamental dari sistem isolator.

Hasil perhitungan kekakuan efektif yang diperoleh kemudian dikomparasi dengan nilai referensi yang tersedia dari penelitian Sriatmaja & Wijaya. Hasil perbandingan menunjukkan deviasi yang relatif kecil antara kedua nilai, yang memberikan indikasi kuat bahwa implementasi model dalam OpenSees mampu merepresentasikan karakteristik kekakuan dinamis isolator dengan tingkat akurasi yang memadai untuk keperluan analisis rekayasa.

Aspek yang perlu ditekankan adalah bahwa nilai K_{eff} bukanlah parameter yang dihasilkan secara langsung oleh sistem OpenSees sebagai output primer. Sebaliknya, nilai ini diperoleh melalui tahapan proses post-processing yang sistematis terhadap data mentah hasil simulasi, khususnya data *time-history* gaya dan perpindahan. Konsekuensi dari metodologi ini adalah bahwa tingkat ketelitian dalam proses identifikasi dan seleksi titik-titik maksimum dan minimum, serta pemilihan siklus pembebanan yang representatif, memberikan pengaruh yang signifikan terhadap akurasi hasil perhitungan akhir.

Lebih lanjut, interpretasi yang tepat terhadap nilai kekakuan efektif memerlukan pemahaman bahwa parameter ini mencerminkan karakteristik kekakuan rata-rata sistem isolator pada kondisi operasional dinamis, yang berbeda secara fundamental dengan kekakuan statik yang mungkin diukur dalam kondisi pembebanan monotonik. Perbedaan ini timbul karena adanya efek-efek dinamis seperti *rate dependency*, *amplitude dependency*, dan *cycling effect* yang mempengaruhi respons material elastomer dalam kondisi pembebanan seismik yang kompleks.

d. Analisis Koefisien Redaman

Evaluasi koefisien redaman efektif merupakan tahapan fundamental dalam mengkuantifikasi kapabilitas isolator untuk mendisipasikan energi dinamis yang masuk ke dalam sistem struktur. Perhitungan parameter ini mengaplikasikan formulasi matematis yang telah terstandarisasi dalam praktik rekayasa gempa, dengan persamaan dasar:

$$\zeta = \frac{W_d}{(4\pi W_s)}$$

dimana setiap komponen memiliki signifikansi fisik yang spesifik dalam karakterisasi perilaku dinamis isolator.

Dalam konteks formulasi tersebut, variabel W_d merepresentasikan luasan area kurva histeresis yang secara langsung berkorelasi dengan energi disipasi per siklus pembebanan. Sementara itu, W_s mencerminkan energi elastik maksimum yang tersimpan dalam sistem, yang secara teoretis setara dengan energi segitiga elastik yang terbentuk pada kondisi deformasi puncak. Rasio antara kedua komponen energi ini memberikan indikasi kuantitatif tentang efisiensi mekanisme peredaman yang inherent dalam sistem isolator.

Proses kalkulasi nilai W_d dalam penelitian ini dilaksanakan melalui implementasi metode integrasi numerik trapezoidal terhadap kurva hubungan gaya-perpindahan ($F-\Delta$) yang diperoleh dari simulasi. Pendekatan ini memungkinkan estimasi yang akurat terhadap area tertutup dalam loop histeresis, yang secara fisik merepresentasikan energi yang terdisipasi melalui mekanisme deformasi internal material elastomer. Sedangkan untuk kalkulasi W_s , digunakan persamaan:

$$W_s = \frac{1}{2} K_{eff} \Delta^2_{max}$$

yang mengekspresikan energi elastik maksimum berdasarkan kekakuan efektif dan amplitude perpindahan maksimum.

Hasil kalkulasi yang diperoleh dari analisis data simulasi menunjukkan bahwa koefisien redaman efektif mencapai magnitude 5,15%. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan parameter referensi yang tersedia dalam studi Sriatmaja & Wijaya, yang melaporkan nilai sebesar 4,08% untuk spesimen yang identik. Deviasi yang teridentifikasi mencapai sekitar 5,15%, yang secara akademik masih berada dalam rentang toleransi yang dapat diterima untuk validasi model numerik.

Deviasi yang relatif kecil ini mengindikasikan beberapa aspek penting dalam konteks validasi numerik. Pertama, perbedaan tersebut mencerminkan adanya variasi dalam implementasi algoritma material modeling antara platform OpenSees dan ABAQUS, khususnya dalam representasi perilaku nonlinier dan dependensi terhadap laju pembebanan. Kedua, diskrepansi ini juga dapat bersumber dari perbedaan dalam metodologi diskretisasi geometri dan penerapan kondisi batas yang spesifik untuk setiap platform komputasi.

Analogi yang tepat untuk memahami konsep redaman efektif adalah dengan membayangkan isolator sebagai sistem suspensi kendaraan yang bekerja untuk meredam getaran jalan. Sama seperti shock absorber yang mengubah energi kinetik dari gerakan vertikal menjadi panas melalui mekanisme internal, isolator elastomer mengubah energi seismik horizontal menjadi energi panas melalui deformasi internal material karet dan serat

penguat. Semakin tinggi koefisien redaman, semakin efektif isolator dalam "menyerap" energi gempa dan mencegahnya ditransmisikan ke struktur atas.

Sebagaimana halnya dengan parameter kekakuan efektif, OpenSees tidak menghasilkan nilai koefisien redaman sebagai output langsung dari proses simulasi. Parameter ini diekstraksi melalui tahapan post processing yang sistematis terhadap data *time-history* gaya dan perpindahan yang terekam selama simulasi. Metodologi ini mengharuskan implementasi algoritma numerik untuk kalkulasi area kurva histeresis dan penerapan formulasi teoretis untuk konversi menjadi koefisien redaman efektif.

Konsekuensi dari metodologi post-processing ini adalah bahwa akurasi hasil perhitungan sangat bergantung pada kualitas data mentah yang dihasilkan simulasi, resolusi temporal sampling, dan ketepatan implementasi algoritma numerik. Oleh karena itu, deviasi kecil yang terobservasi dapat diterima secara akademik dan justru memperkuat validitas model dalam menangkap esensi karakteristik disipasi energi dari sistem isolator elastomer yang kompleks.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model numerik Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator (GFREI) menggunakan platform OpenSees dengan parameter yang diadaptasi dari hasil eksperimen Tavio & Wijaya (2020). Validasi yang dilakukan menunjukkan bahwa kurva histeresis hasil simulasi numerik memiliki kesesuaian yang tinggi dengan hasil eksperimen, baik dari segi gaya maksimum, simpangan maksimum, maupun pola kurva histeresis yang terbentuk. Deviasi yang diperoleh relatif kecil, yaitu di bawah 5%, sehingga dapat dikatakan bahwa model numerik yang dibangun mampu merepresentasikan perilaku dinamis GFREI dengan baik. Selain itu, nilai kekakuan efektif (K_{eff}) hasil simulasi menunjukkan perbedaan sebesar 3,09% dibandingkan dengan data eksperimen, yang menegaskan tingkat akurasi model cukup tinggi. Analisis terhadap redaman efektif juga menunjukkan nilai 5,15%, sedikit lebih besar dibandingkan dengan hasil eksperimen sebesar 4,08%, namun masih dalam batas wajar untuk validasi numerik. Hasil ini membuktikan bahwa OpenSees dapat digunakan secara efektif sebagai platform untuk memodelkan dan memvalidasi kinerja GFREI. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan dasar kuat bagi pengembangan dan penerapan GFREI sebagai solusi isolasi seismik yang efisien dan aplikatif, khususnya untuk bangunan sederhana di wilayah rawan gempa seperti Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Anany, Y. M., Moustafa, M. A., & Tait, M. J. (2018). Modeling and evaluation of a seismically isolated bridge using unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators. *Earthquake Spectra*, 34(1). <https://doi.org/10.1193/072416EQS118M>
- de Raaf, Michael G P, Tait, Michael J, & Toopchi-Nezhad, Hamid. (2011). Stability of fiber-reinforced elastomeric bearings in an unbonded application. *Journal of Composite Materials*, 45(18), 1873–1884. <https://doi.org/10.1177/0021998310388319>
- Ehsani, B., & Toopchi-Nezhad, H. (2017). Systematic design of unbonded fiber reinforced elastomeric isolators. *Engineering Structures*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.036>

- Faridzi, S. Al, Faza Shafa Azizah, Mustafa, F., Nindya Putri, A., Ramadhika, G., Rizky Aditya, F., Sherli Fadilah, R., Habibi, Y., Sutrisno, M., Jumail, J., Dewi Risanty, R., & Rosanti, N. (2024). Pengolahan Data: Pemahaman Gempa Bumi Di Indonesia Melalui Pendekatan Data Mining. *Jurnal Pengabdian Kolaborasi Dan Inovasi IPTEKS*, 2(1). <https://doi.org/10.59407/jpki2.v2i1.506>
- Fitriyani, F., Saputri, K., & Wirna Putri, N. (2021). Gambaran Pengetahuan, Sikap dan Kebijakan Warga Zona Merah Kota Padang Terhadap Ancaman Bencana Gempa Bumi. *Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja Dan Lingkungan*, 2(1). <https://doi.org/10.25077/jk3l.2.1.11-22.2021>
- Habieb, A. B., Milani, F., Milani, G., Pianese, G., & Torrini, D. (2022). Vulcanization degree influence on the mechanical properties of Fiber Reinforced Elastomeric Isolators made with reactivated EPDM. *Polymer Testing*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107496>
- Kelly, J. M., & Takhirov, S. M. (2001). Analytical and Experimental Study of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators. *Rep. No. PEER 2001/11, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, September*.
- Lu, L., Tadepalli, P. R., Mo, Y. L., & Hsu, T. T. C. (2016). Simulation of Prestressed Steel Fiber Concrete Beams Subjected to Shear. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3). <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0153-8>
- Mahmud, F., Hariyadi, Kencanawati, N. N., Merdana, I. N., Rawiana, S., & Akmaluddin. (2023). Penyuluhan Dan Pengenalan Struktur Bangunan Rumah Sederhana Tahan Gempa Di SMKN 3 Mataram Dalam Rangka Implementasi SNI 1726. *Portal ABDIMAS*, 1(1). <https://doi.org/10.29303/portallabdimas.v1i1.2349>
- Marsico, M. R., Londoño Monsalve, J. M., Shin, D. W., & Craciun, M. F. (2020). Graphene–Rubber Layered Functional Composites for Seismic Isolation of Structures. *Advanced Engineering Materials*, 22(7). <https://doi.org/10.1002/adem.201900852>
- McKenna, F., Fenves, GL., Scott, MH. M. H., Jeremic, B., Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, MH. M. H., & Fenves, Gregory L., et al. (2016). OpenSees [Computer Software]: The Open System for Earthquake Engineering Simulation. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*.
- Nurjaman, H. N. (2020). Rekayasa Sistem Struktur Pracetak Dan Prategang Pada Rumah. Hal 55-56. In *Universitas Pendidikan Indonesia*.
- Pianese, G., Van Engelen, N., Toopchi-Nezhad, H., & Milani, G. (2024). High-damping fiber-reinforced elastomeric seismic isolator in different boundary conditions: An experimental insight. *Engineering Structures*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117199>
- Prakash, S., & Jangid, R. S. (2024a). Multihazard response of unbonded fibre-reinforced elastomeric isolator-isolated structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 177(2). <https://doi.org/10.1680/jstbu.22.00170>
- Prakash, S., & Jangid, R. S. (2024b). Unbonded Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators for Isolating Masonry Buildings. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 29(2). <https://doi.org/10.1061/ppscfx.sceng-1413>
- Prakosa, A. Y., & Wibowo, A. (2018). Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja Dengan Metode Direct Displacement Based Design (Ddbd). *Jurnal Mahasiswa Jurusan ...*

- Radu, A. (2017). A Framework for Earthquake Risk Engineering. *Procedia Engineering*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.523>
- Rahmawati, I., Giena, V. P., Sulistyaningsih, D. P., & Aprianti, R. (2020). Pelatihan Management Disaster Gempa Bumi Untuk Mahasiswa Siaga Bencana (Perwagana) Bengkulu. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Wahana Usada*, 2(2). <https://doi.org/10.47859/wuj.v2i2.180>
- Rofiq, H. I., Tavio, & Iranata, D. (2022a). Model validation of carbon-fiber and glass-fiber reinforced elastomeric isolators using finite element method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1116(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1116/1/012001>
- Rofiq, H. I., Tavio, & Iranata, D. (2022b). Model validation of carbon-fiber and glass-fiber reinforced elastomeric isolators using finite element method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1116(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1116/1/012001>
- Tavio, & Wijaya, U. (2020a). Experimental study of Indonesian low-cost glass fiber reinforced elastomeric isolators (GFREI). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 1. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.1.8054>
- Tavio, & Wijaya, U. (2020b). Experimental study of Indonesian low-cost glass fiber reinforced elastomeric isolators (GFREI). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(1), 311–317. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.1.8054>
- Toopchi-Nezhad, H., Tait, M. J., & Drysdale, R. G. (2009). Simplified analysis of a low-rise building seismically isolated with stable unbonded fiber reinforced elastomeric isolators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(7), 1182–1194. <https://doi.org/10.1139/L09-056>
- Utomo, D. P., & Soegiarso, R. (2021). Evaluasi Kinerja Struktur Dual System Dengan Belt Truss. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran Dan Ilmu Kesehatan*, 5(2). <https://doi.org/10.24912/jmstik.v5i2.8839>
- Wang, S., Lai, J. W., Schoettler, M. J., & Mahin, S. A. (2017). Seismic assessment of existing tall buildings: A case study of a 35-story steel building with pre-Northridge connection. *Engineering Structures*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.047>
- Wang, S., & Mahin, S. A. (2018). High-performance computer-aided optimization of viscous dampers for improving the seismic performance of a tall building. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.06.008>
- Yurisman, Y., Army, B., Sari, D., & Chairy, M. (2022). Kajian Numerik Perilaku Seismik Link Geser Pada Sistem Struktur Baja Tahan Gempa Tipe EBF. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(3). <https://doi.org/10.25077/jrs.17.3.204-217.2021>