

Validasi Model Numerik *Viscoelastic Damper* untuk Peningkatan Kinerja Seismik Struktur Beton Bertulang

F. H. Rasyid¹, A. F. Setiawan^{1*}, I. S. Irawati¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: angga.fajar.s@ugm.ac.id

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem *viscoelastic damper* (VED) dalam meningkatkan performa seismik struktur beton bertulang melalui pendekatan numerik berbasis pemodelan nonlinier. Model histeretik Bouc–Wen digunakan untuk merepresentasikan respons VED terhadap pembebanan gempa, dengan mempertimbangkan fenomena degradasi kekakuan dan efek siklik. Berbeda dengan studi sebelumnya yang umumnya menggunakan analisis *pushover*, penelitian ini mengadopsi skema *quasi-static cyclic loading* berbasis displacement-controlled untuk menggambarkan respons histeretik secara akurat. Model numerik dibangun dalam dua skala, yaitu skala mikro (tingkat material dan elemen VED) dan makro (struktur rangka dua lantai) dengan konfigurasi elemen *twoNodeLink* vertikal antar lantai untuk memodelkan VED. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik terhadap data eksperimen dari Eskandari Nasab et al. (2021). Hasil menunjukkan bahwa model Bouc–Wen mampu menangkap karakteristik nonlinier viskoelastik secara memadai, dibuktikan melalui kesesuaian kurva histeresis gaya-perpindahan dan kapasitas disipasi energi terhadap hasil pengujian. Penelitian ini menunjukkan potensi pendekatan numerik dalam mendukung perancangan dan analisis sistem peredam energi untuk retrofit struktur tahan gempa.

Kata kunci: *viscoelastic damper*, Bouc-Wen, STKO OpenSees, validasi numerik, performa seismik.

1 PENDAHULUAN

Bangunan tahan gempa perlu ditambahkan sistem peredam untuk mengurangi kerusakan jika terjadi gempa. Meskipun dirancang untuk menahan beban seismik, struktur eksisting maupun bangunan konvensional sering kali memiliki kapasitas deformasi yang terbatas untuk menyerap energi gempa secara optimal. Hal ini menjadi semakin penting terutama pada bangunan vital seperti rumah sakit dan fasilitas pendidikan, di mana kerusakan dapat mengganggu fungsi kritis selama dan setelah bencana. Oleh karena itu, diperlukan sistem tambahan yang mampu meningkatkan redaman struktur guna menurunkan respons dinamis secara signifikan.

Salah satu perangkat yang banyak digunakan untuk tujuan peningkatan kinerja seismik adalah *viscoelastic damper* (VED). Perangkat ini bekerja dengan mengonversi energi kinetik akibat gaya seismik menjadi energi panas melalui deformasi material viskoelastis, sehingga mengurangi energi yang ditransfer ke elemen struktural utama. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa VED mampu berkontribusi secara signifikan terhadap disipasi energi struktur selama peristiwa gempa. Dalam konfigurasi dan desain yang optimal, VED dapat menyerap hingga 50–80% dari total energi input gempa, tergantung pada karakteristik material, frekuensi pembebanan, dan lokasi penempatan dalam struktur (Javidan et al., 2020; Christopoulos & Filiatrault, 2006; Zhang & Makris, 2001).

Efektivitas ini secara langsung berdampak pada pengurangan simpangan antar lantai serta penurunan gaya internal pada elemen struktural. Oleh karena itu, pemanfaatan VED tidak hanya terbukti menurunkan potensi kerusakan struktural, tetapi juga memberikan manfaat tambahan berupa stabilitas performa dalam siklus gempa berulang. Sejalan dengan itu, pengembangan model numerik yang akurat dan representatif menjadi krusial untuk mendukung aplikasi VED dalam desain retrofit dan struktur tahan gempa berskala penuh.

Model Bouc–Wen merupakan salah satu pendekatan populer dalam merepresentasikan perilaku nonlinier *viscoelastic damper* (VED), karena mampu menggambarkan degradasi kekakuan dan gaya tahan akibat beban bolak-balik (Foliente, 1995; Wen, 1976). Namun, sebagian besar studi sebelumnya, termasuk Eskandari Nasab et al. (2021), berfokus pada simulasi berbasis analisis *pushover* atau pembebanan monotonik, tanpa mempertimbangkan perilaku siklik dari sistem peredam. Padahal, pengaruh siklik sangat penting untuk menggambarkan karakteristik histeretik dan kapasitas disipasi energi aktual dari VED dalam kondisi pembebanan berulang akibat gempa.

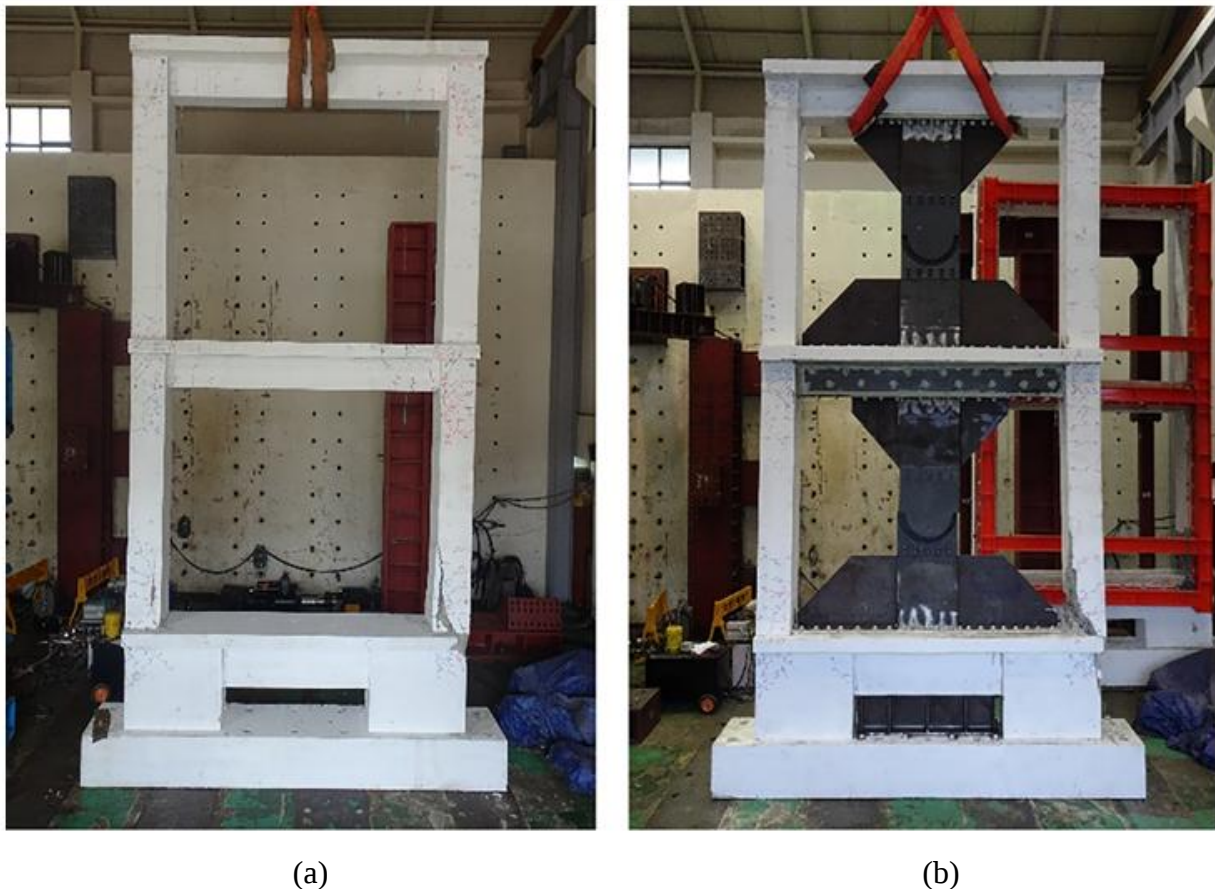
Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan pendekatan numerik berbasis analisis *displacement-controlled cyclic loading* untuk mengkaji respons VED secara realistis. Simulasi dilakukan melalui pendekatan analisis *quasi-static cyclic* dengan input berupa *displacement sinusoidal* beramplitudo bertingkat. Model numerik disusun dalam dua pendekatan skala, yaitu mikro (tingkat material dan elemen *damper*) dan makro (respons global struktur beton bertulang dua lantai). Perangkat *damper* dimodelkan menggunakan elemen *twoNodeLink* yang menggabungkan material Bouc–Wen sebagai komponen histeretik dan *ViscousDamper* sebagai komponen viskositas murni. Model ini divalidasi terhadap data eksperimen dari literatur, dengan tujuan menghasilkan representasi numerik yang akurat dan dapat dijadikan acuan untuk penerapan VED dalam struktur bangunan berskala penuh.

2 METODE

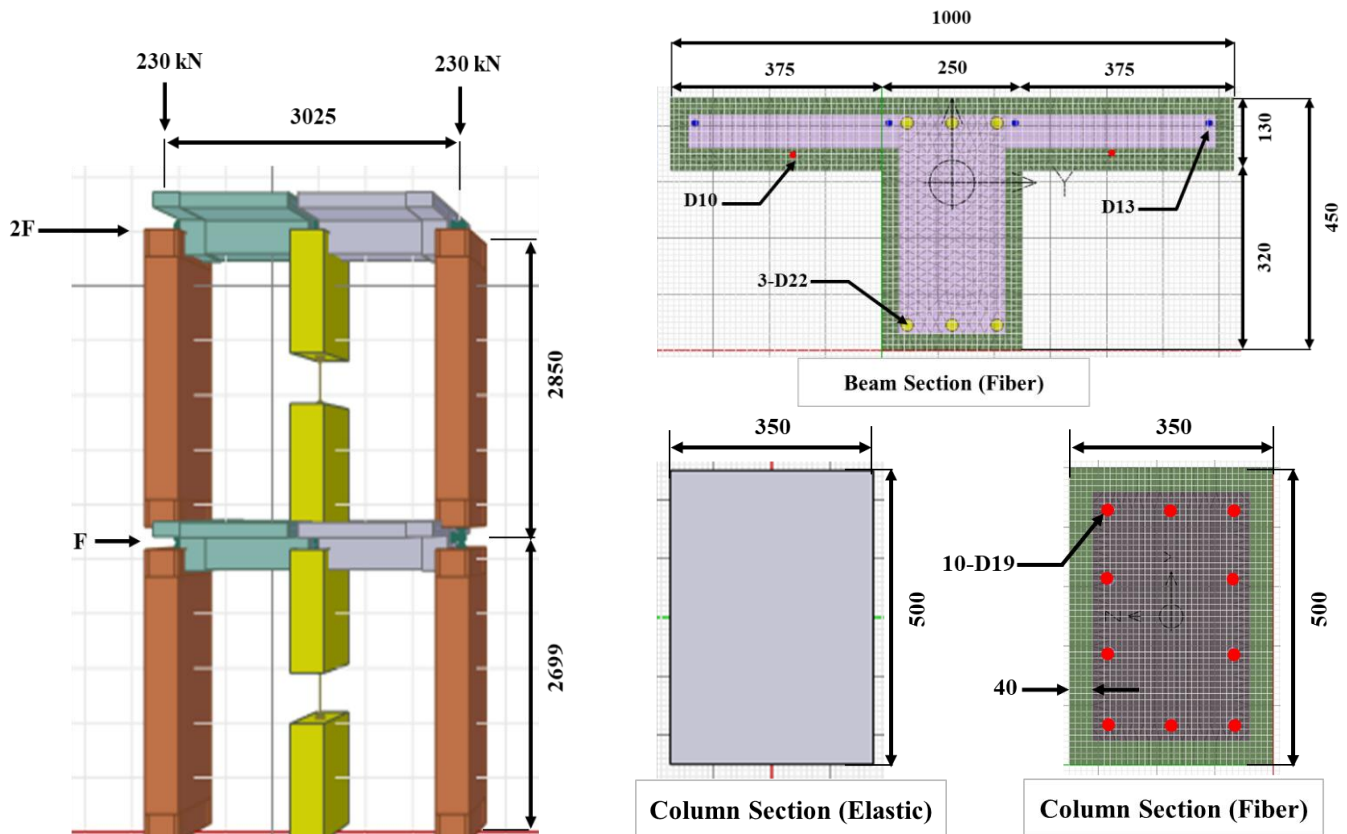
2.1 Konfigurasi Model Struktur

Model struktur yang digunakan berupa rangka beton bertulang dua lantai dengan tiga konfigurasi uji, yaitu: (1) portal terbuka tanpa peredam, (2) portal dengan VED 17 mm, dan (3) portal dengan VED 22 mm. VED diposisikan secara vertikal antar lantai untuk mengevaluasi kontribusi redaman terhadap respons struktur. Dimensi geometrik, properti material, serta konfigurasi penempatan *damper* mengacu pada data eksperimen dari Eskandari Nasab et al. (2021) dapat dilihat pada Gambar 1. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan pendekatan makro-elemen, di mana elemen balok dan kolom dimodelkan sebagai nonlinear *beam-column elements* dengan distribusi penampang *fiber* untuk menangkap perilaku plastis material (Gambar 2).

Joint antar elemen struktur diasumsikan sebagai *rigid connection*, artinya dalam pemodelan ini tidak mempertimbangkan kerusakan geser maupun deformasi di *joint*, sehingga analisis terbatas pada respons lentur dan aksial. Ketiga model digunakan untuk membandingkan pengaruh VED terhadap disipasi energi dan pengendalian deformasi.



Gambar 1. Spesimen uji rangka beton bertulang dua lantai (Eskandari Nasab et al., 2021).



Gambar 2. Detail geometri spesimen uji rangka beton bertulang dua lantai (Eskandari Nasab et al., 2021).

2.2 Parameter Simulasi

Viscoelastic damper (VED) direpresentasikan sebagai kombinasi paralel antara elemen histeretik dan viskos, yang dimodelkan melalui *link element*. Komponen histeretik menggunakan model Bouc–Wen, yang dikenal mampu menangkap karakteristik *loop histeresis*, degradasi kekakuan, dan gaya tahanan nonlinier akibat pembebanan bolak-balik. Adapun komponen viskos direpresentasikan dengan *ViscousDamper Material* (*dashpot*) untuk mencerminkan redaman kecepatan.

Model Bouc–Wen merupakan salah satu pendekatan matematis yang umum dalam merepresentasikan perilaku histeretik sistem struktur. Dengan memanfaatkan parameter α (rasio elastik), β dan γ (parameter bentuk lengkung histeresis), serta eksponen n (nonlinearitas), model ini mampu menggambarkan hubungan gaya-perpindahan dalam sistem dinamis. Dalam konteks *viscoelastic damper*, model Bouc–Wen digunakan untuk merepresentasikan efek siklik dan degradasi histeretik berdasarkan parameter hasil *fitting* eksperimen. Parameter model Bouc–Wen diambil dari kalibrasi hasil eksperimen: yang dilakukan oleh Eskandari Nasab et al. (2022) seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter untuk model Bouc-Wen (Eskandari Nasab et al., 2022).

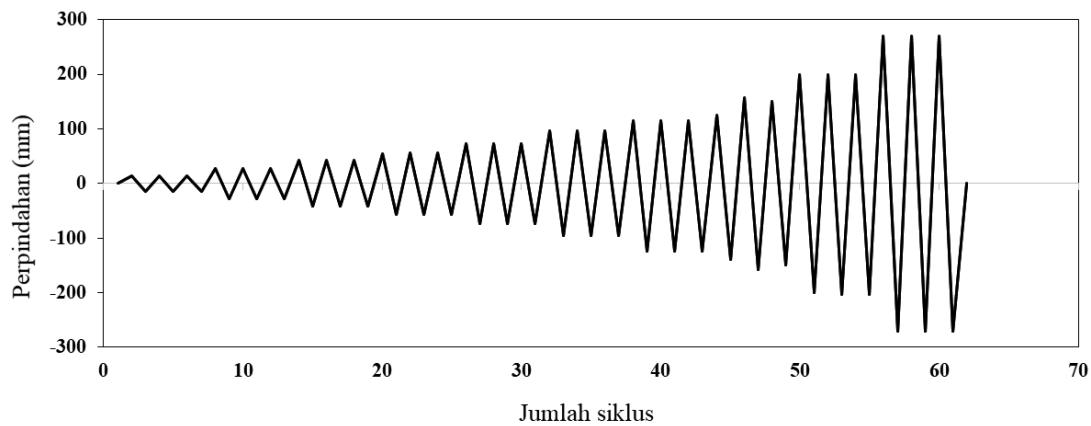
	Plastic-Wen parameters						Dashpot parameters	
	$k_0(kN/mm)$	a	n	γ	β	A	C	θ
Batas atas	12,38	0,494	2,38	-0,53	0,53	1,0	59,7	0,02
Nilai rata-rata	9,91	0,494	2,38	-0,53	0,53	1,0	46,6	0,02
Batas bawah	7,92	0,494	2,38	-0,53	0,53	1,0	39,8	0,02

2.3 Model Numerik Struktur dan Protokol Pembebanan

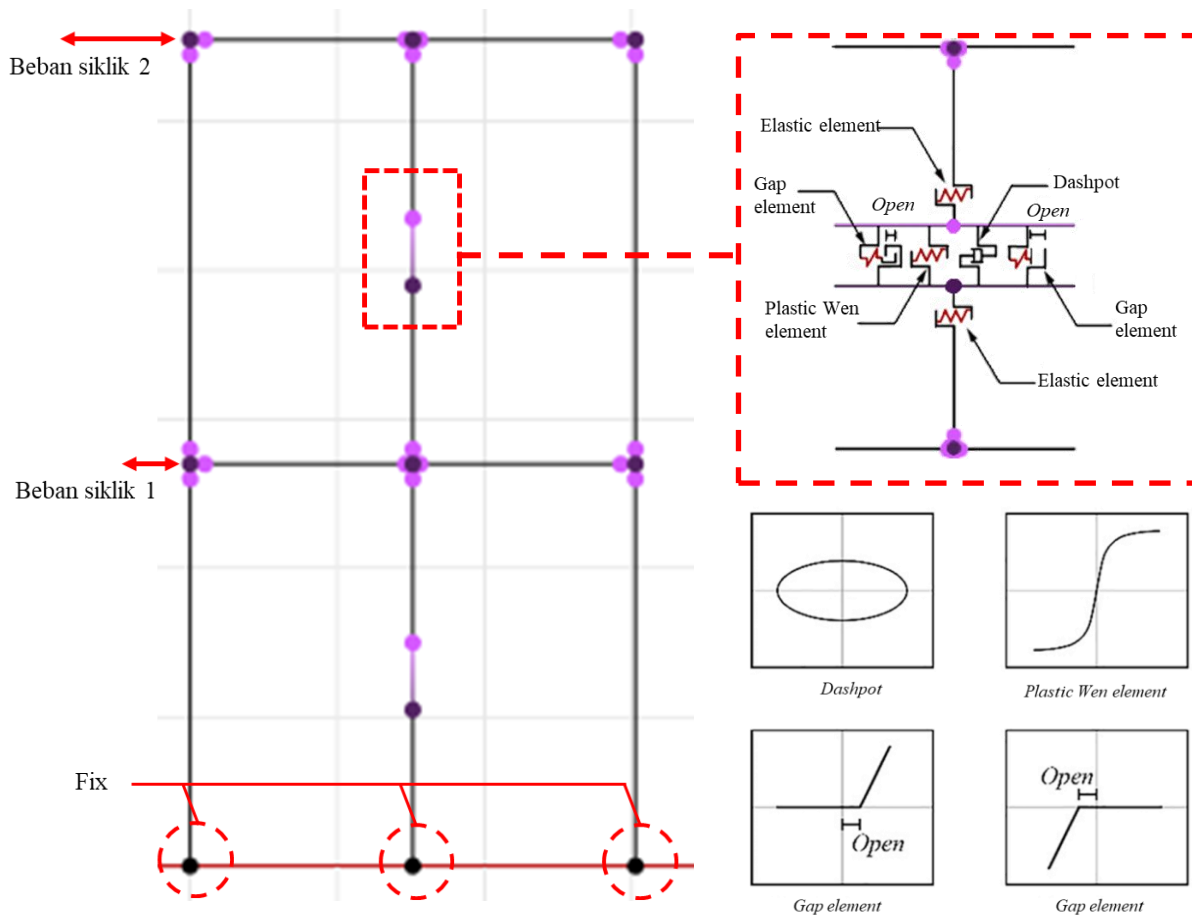
Model numerik dibangun dengan dua tingkat pendekatan, yaitu skala mikro untuk elemen *viscoelastic damper* (VED) dan skala makro untuk struktur beton bertulang dua lantai. Pada tingkat makro, struktur dimodelkan menggunakan elemen batang (*frame element*) dengan idealisasi sendi plastis terkonsentrasi (*concentrated plastic hinge*) pada ujung

balok dan kolom. Setiap penampang plastis dimodelkan sebagai *fiber section* yang terdiri dari komposisi serat beton dan tulangan baja, sehingga mampu menangkap respons material nonlinier akibat pembebanan bolak-balik.

Untuk pemodelan VED, digunakan kombinasi material Bouc–Wen dan *viscousDamper* dalam elemen *twoNodeLink* yang ditempatkan secara vertikal antar lantai (Gambar 3). Simulasi dilakukan dengan analisis *quasi-static displacement-controlled cyclic* menggunakan input sinusoidal berfrekuensi rendah guna mengabaikan efek inersia, menyerupai kondisi pengujian laboratorium sebagaimana pada eksperimen Eskandari Nasab et al. (2021). Input pembebanan diberikan dalam format *PathTimeSeries*, dan output utama berupa kurva histeresis gaya–perpindahan digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian bentuk kurva, kapasitas disipasi energi, serta kekakuan efektif VED terhadap data eksperimen. *Loading protocol* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Loading protocol (Eskandari Nasab et al., 2021).



Gambar 3. Model numerik struktur beton bertulang 2 lantai dan analisis model VED (Eskandari Nasab et al., 2021).

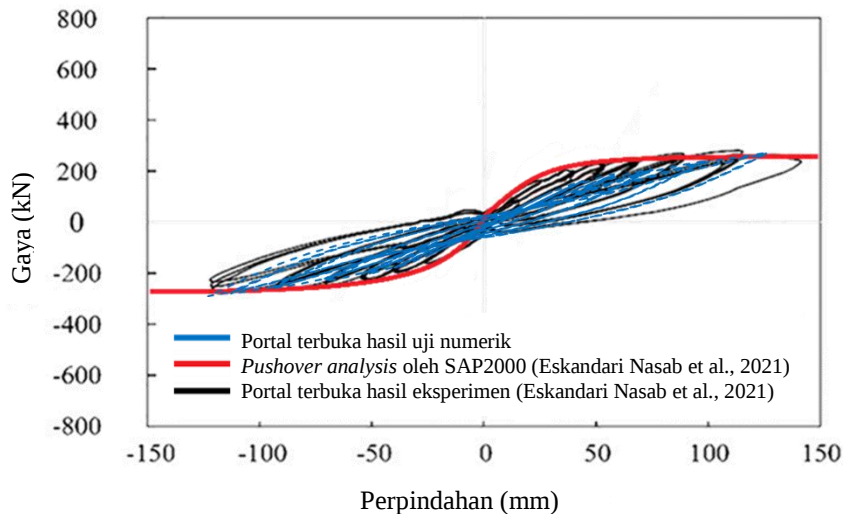
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Simulasi Kurva Histeresis

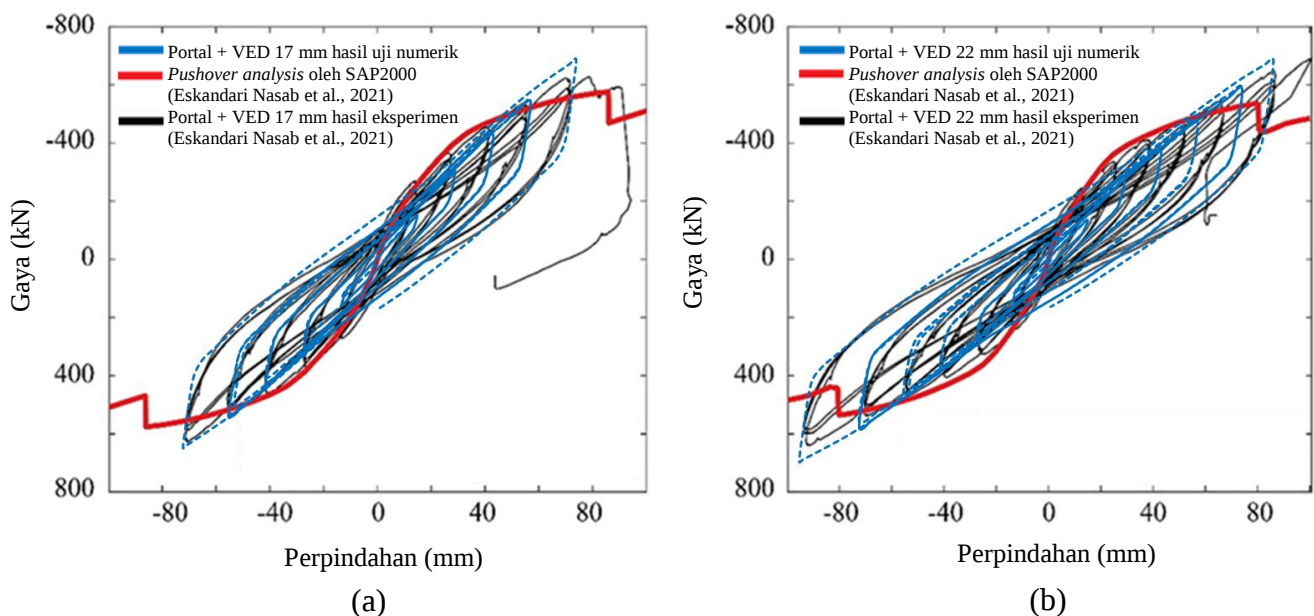
Hasil simulasi numerik menghasilkan kurva histeresis gaya–perpindahan (*force–displacement hysteresis curve*) yang menunjukkan kesesuaian bentuk umum dengan data eksperimen oleh Eskandari Nasab et al. (2021). Secara kualitatif, kurva memperlihatkan siklus beban bolak-balik dengan pola loop yang konsisten membesar seiring bertambahnya amplitudo pembebanan. Hal tersebut terjadi pada ketiga model.

Namun demikian, terdapat perbedaan mendasar antara hasil eksperimen dan simulasi pada, khususnya setelah terjadi leleh. Pada pengujian eksperimental untuk model portal terbuka, proses retak pada elemen beton (seperti balok dan kolom) menghasilkan tambahan disipasi energi akibat degradasi material dan friksi internal. Hal ini memberikan energi disipasi tambahan (Gambar 6).

Sedangkan untuk kedua model dengan perendam hal tersebut tidak begitu berpengaruh karena VED memberikan kekakuan dan redaman tambahan pada struktur. Hasil simulasi menunjukkan kurva histeresis yang serupa dengan hasil eksperimen. Simulasi menunjukkan bahwa VED mampu mengurangi simpangan dan meningkatkan kapasitas disipasi energi secara signifikan. Dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Perbandingan kurva hasil eksperimen, *push over*, dan uji siklik. (portal terbuka).

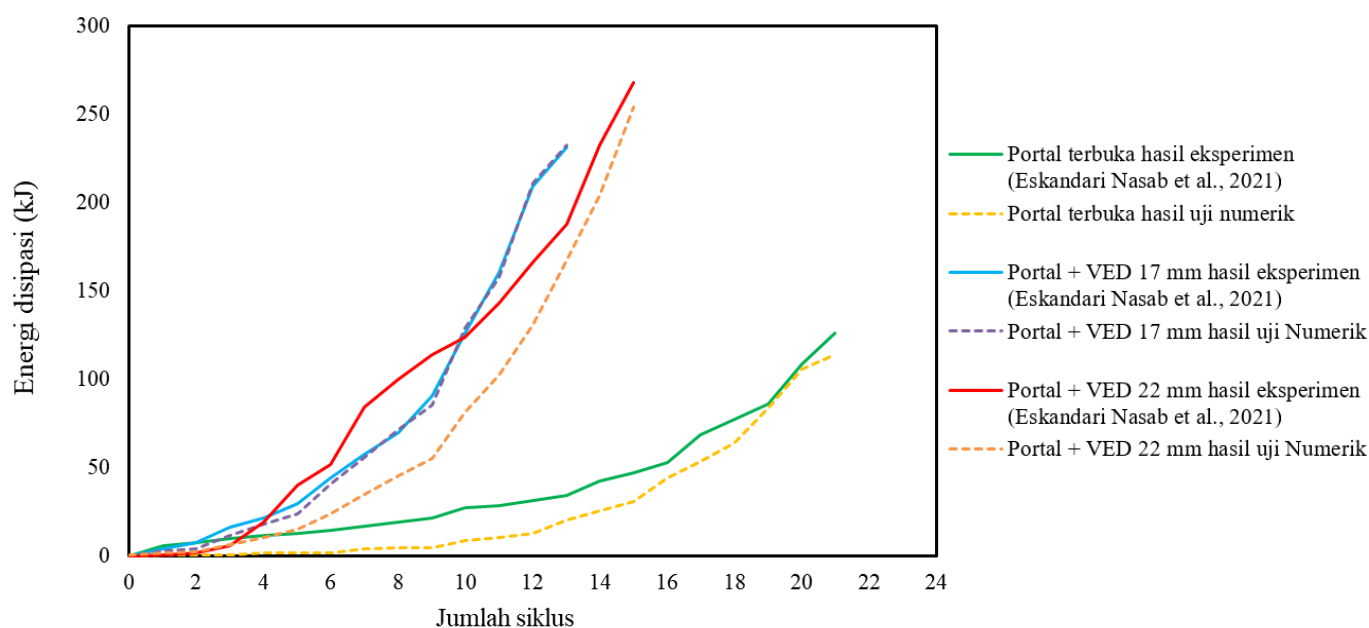


Gambar 7. Perbandingan kurva hasil eksperimen, *push over*, dan uji siklik; (a) VED 17 mm dan (b) VED 22 mm.

3.2 Perbandingan Area Kurva Histeresis dan Energi Disipasi

Evaluasi kuantitatif dilakukan dengan membandingkan luas area kurva histeresis, yang merupakan indikator langsung dari energi disipasi per siklus. Berdasarkan hasil numerik pada portal terbuka, portal dengan VED 17 mm, dan portal dengan VED 22 mm berturut-turut semakin mendekati hasil dari pengujian eksperimen, hal tersebut dikarekan parameter *Viscous Damper Material* dan model Bouc–Wen. Dalam jurnal acuan terdapat berbagai variasi nilai untuk parameter *Viscous Damper Material* (nilai K dan C_d), akan tetapi hanya terdapat satu model Bouc–Wen (untuk VED 17 mm), sehingga memberikan hasil yang berbeda untuk portal dengan VED 22 mm (Gambar 8).

Peningkatan energi disipasi juga tampak sebanding dengan peningkatan amplitudo displacement yang diberikan. Simulasi dengan VED 22 mm menghasilkan kurva yang lebih tebal (*loop* lebih lebar) dibandingkan VED 17 mm, menandakan kapasitas disipasi energi yang lebih besar seiring dengan peningkatan kekakuan dan redaman viskoelastik. Hasil ini mengindikasikan bahwa model Bouc–Wen sangat akurat dalam menggambarkan respons *nonlinier viskoelastik*.



Gambar 8. Perbandingan energi disipasi tanpa dan dengan VED antara jurnal dan hasil numerik.

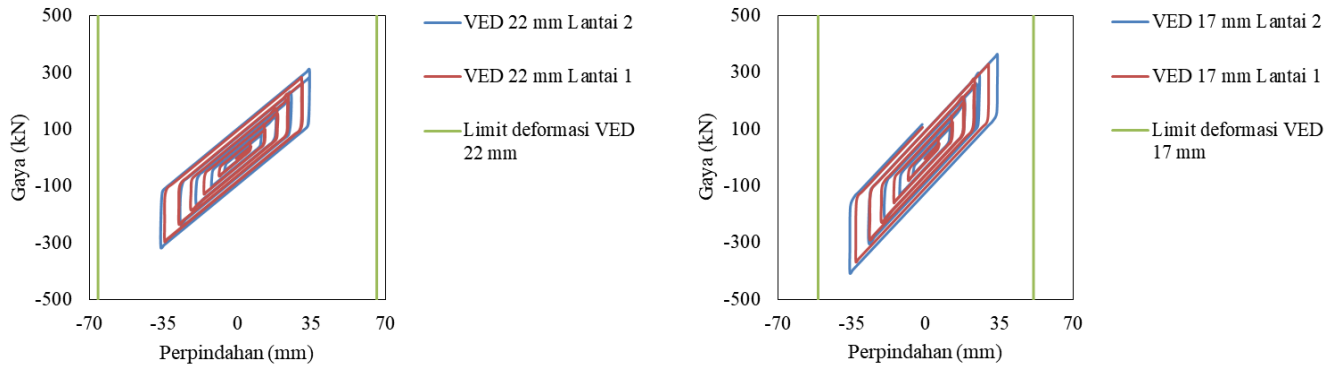
3.3 Perbandingan Area Kurva Histeresis dan Energi Disipasi

Dari ketiga model memiliki jumlah siklus yang berbeda sesuai dengan kemampuan dari masing-masing model dalam menahan beban. Untuk membandingkan ketiga model digunakan jumlah siklus yang sama yakni 13 siklus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *viscoelastic damper* (VED) berkontribusi signifikan terhadap peningkatan energi disipasi total struktur. Berdasarkan selisih antara energi disipasi total dan energi yang diserap oleh struktur (s.d siklus ke-13) tanpa VED, diperoleh bahwa VED tipe 17 mm menyumbang sekitar 74,1%, sementara VED tipe 22 mm menyumbang hingga 72,8%, menandakan tingginya efektivitas perangkat dalam meredam respons seismik secara pasif (Tabel 2).

Tabel 2. Perbandingan Energi disipasi pada siklus ke-13.

Model	Total energi disipasi s.d. siklus ke-13 (kJ)			Persentase VED
	Total	VED	Struktur	
Portal terbuka	40,45	-	40,45	-
Portal + VED 17 mm	663,35	491,27	172,08	74,1%
Portal+ VED 22 mm	548,00	398,93	149,07	72,8%

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi pada *viscoelastic damper* (VED) masih berada dalam batas deformasi izin material, sebagaimana direkomendasikan oleh Eskandari Nasab et al. (2021). Nilai ini berada di bawah ambang batas deformasi izin *viscoelastic* sebesar 300% dari tebal material *viscoelastic*, yang ditetapkan sebagai batas aman perilaku linier-viskoelastik dari material *damper* seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Kurva histeresis gaya–perpindahan VED 17 mm dan VED 22 mm yang bekerja pada struktur.

4 KESIMPULAN

Validasi numerik dengan menggunakan model Bouc–Wen menunjukkan kemampuan yang baik dalam merepresentasikan perilaku *viscoelastic damper* (VED) secara numerik. Pemodelan makro dengan konsiderasi beban *quasi-static* mampu mendekati hasil eksperimen dan mengungkap perilaku histeretik dari sistem peredaman. Hasil simulasi memperlihatkan kesesuaian yang tinggi antara kurva numerik dan data eksperimen, serta menunjukkan kontribusi signifikan VED dalam menghasilkan tambahan energi disipasi pada struktur. Dengan demikian, VED terbukti efektif dalam mereduksi respons seismik dan layak digunakan sebagai solusi retrofit untuk meningkatkan performa seismik bangunan.

REFERENSI

- Eskandari Nasab, M. S., Javidan, M. M., Chun, S., & Kim, J. (2021). Experimental study on seismic retrofit of a RC frame using viscoelastic dampers. *Structures*, 34, 771–786. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.035>.
- Eskandari Nasab, M. S., Chun, S., & Kim, J. (2022). Seismic retrofit system made of viscoelastic polymer composite material and thin steel plates. *Steel and Composite Structures*, 43(2), 153–164. <https://doi.org/10.12989/scs.2022.43.2.153>.
- Wen, Y. K. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 102(2), 249–263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1976\)102:2\(249\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1976)102:2(249)).
- Xue, Y. (2013). A modified Bouc–Wen model for viscoelastic dampers under large deformation. *Journal of Sound and Vibration*, 332(2), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.08.036>.
- Foliente, G. C. (1995). Hysteresis modeling of wood joints and structural systems. *Journal of Structural Engineering*, 121(6), 1013–1022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:6\(1013\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:6(1013)).
- Hossain, M. S., & Ashraf, M. (2012). Application of Bouc–Wen model to represent nonlinear behavior of MR damper. *Journal of Mechanical Engineering*, 43(2), 113–120.
- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- Constantinou, M. C., & Symans, M. D. (1992). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *Journal of Structural Engineering*, 118(4), 1107–1124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:4\(1107\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:4(1107)).
- Spencer Jr, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845–856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845)).
- Hwang, J. S., & Fu, C. C. (2016). Performance evaluation of viscoelastic dampers under earthquake loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(1), 157–172. <https://doi.org/10.1002/eqe.2649>.
- Jiang, Z., Li, Y., & Li, H. (2018). Parametric study of viscoelastic dampers for seismic mitigation. *Engineering Structures*, 165, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.010>.
- Kumar, M., & Reddy, G. R. (2015). Modeling and analysis of viscoelastic dampers for seismic applications. *Nuclear Engineering and Design*, 290, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.01.005>.

- Zhang, R., & Soong, T. T. (1992). Seismic design of viscoelastic *dampers* for structural applications. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1375–1392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:5\(1375\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1375)).
- Takewaki, I. (2000). Optimal *dampers* placement for minimum transfer functions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(4), 587–603. <https://doi.org/10.1002/eqe.933>.
- Bagheri, S., & Taghikhany, T. (2020). Nonlinear modeling of MR and VED *dampers* using OpenSees. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(3), e2509. <https://doi.org/10.1002/stc.2509>.
- Shariatmadar, H., & Mohammadi, M. (2022). Experimental and numerical study on combined friction-viscoelastic *dampers*. *Engineering Structures*, 256, 113981. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113981>.
- Javidan, M. M., Kim, J., & Eskandari Nasab, M. S. (2020). Seismic performance of RC frames retrofitted with viscoelastic *dampers*. *Engineering Structures*, 216, 110752. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110752>.