PADURAKSA
Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa
ISSN Print : https://issn.brin.go.id/terbit/detail/1355981664
ISSN Online : https://issn.brin.go.id/terbit/detail/1492572000

PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa
Juni 2026, Volume 15: Nomor 1
https://doi.org/10.22225/pd.15.1.15188.21-35
Available online at https://www.ejournal.warmadewa.ac.id/index.php/paduraksa

Studi perilaku *slit link* pada sistem *eccentrically braced frame* (EBF) untuk kategori *link* pendek

Gokma Ferdinanta Sihombing[1,*], Jusuf Wilson Meynerd Rafael[1,2], Budi Suswanto[1]
[1]Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
[2]Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang, Kupang, Nusa Tenggara Timur, Indonesia
[*]Corresponding authors: ferdisihombing04@gmail.com

Submitted: 9 June 2026, Revised: 18 June 2026, Accepted: 23 June 2026

ABSTRACT: Link beams in Eccentrically Braced Frame (EBF) systems are designed to act as energy dissipation components by undergoing controlled plastic deformation during seismic events. However, conventional links often experience high stress concentrations that may reduce their seismic performance. This study evaluates the influence of slit geometry on stress distribution, hysteretic response, deformation capacity, and ductility of short-link beams in EBF systems. Six slit-link models based on a WF 588×300×12×20 section were numerically investigated using the finite element method in Abaqus, consisting of three block-slit models (SL-B1, SL-B2, and SL-B3) and three parabolic-slit models (SL-P1, SL-P2, and SL-P3). Cyclic loading was applied following the AISC 341-22 loading protocol, while monotonic loading was used to generate backbone curves and ductility parameters. The results indicate that increasing slit spacing improves both ultimate strength and initial stiffness for all models. The ultimate capacity increased from 188.49 kN in model SL-B1 to 391.03 kN in model SL-B3 and from 201.39 kN in model SL-P1 to 456.45 kN in model SL-P3. Stress distribution analysis revealed that parabolic slits provide a more uniform stress distribution and lower stress concentration than block slits. Model SL-P3 exhibited the best overall performance with an ultimate capacity of 456.45 kN, a ductility factor of 2.94, and a Relative Energy Dissipation Factor (REDF) of 3.20. Failure mechanisms were concentrated within the slit region without significant yielding in the flange or end-plate components. The findings demonstrate that parabolic slit configurations can significantly enhance the strength, ductility, and energy dissipation capacity of short-link elements in EBF systems compared with conventional block-slit configurations.

KEYWORDS: eccentrically braced frame; ductility; energy dissipation; short link: slit link.

ABSTRAK: Elemen link pada sistem Eccentrically Braced Frame (EBF) berfungsi sebagai komponen disipasi energi yang dirancang mengalami deformasi plastis saat terjadi gempa. Namun, link konvensional cenderung mengalami konsentrasi tegangan yang tinggi sehingga berpotensi menurunkan kinerja seismik struktur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh geometri slit terhadap distribusi tegangan, respons histeresis, kapasitas deformasi, dan daktilitas balok link pendek pada sistem EBF. Sebanyak enam model slit link berbasis profil WF 588×300×12×20 dianalisis secara numerik menggunakan metode elemen hingga pada perangkat lunak Abaqus, yang terdiri atas tiga model block slit (SL-B1, SL-B2, dan SL-B3) dan tiga model parabolic slit (SL-P1, SL-P2, dan SL-P3). Pembebanan siklik diterapkan berdasarkan protokol AISC 341-22, sedangkan pembebanan monotonik digunakan untuk memperoleh kurva backbone dan parameter daktilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jarak antar slit meningkatkan kapasitas gaya maksimum dan kekakuan awal pada seluruh model. Kapasitas ultimit meningkat dari 188.49 kN pada model SL-B1 menjadi 391.03 kN pada model SL-B3, serta dari 201.39 kN pada model SL-P1 menjadi 456.45 kN pada model SL-P3. Analisis distribusi tegangan menunjukkan bahwa geometri parabolic slit menghasilkan penyebaran tegangan yang lebih merata dibandingkan block slit sehingga mampu mengurangi konsentrasi tegangan lokal. Model SL-P3 memberikan performa terbaik dengan kapasitas ultimit 456.45 kN, daktilitas 2.94, dan Relative Energy Dissipation Factor (REDF) sebesar 3.20. Mekanisme keruntuhan seluruh model terkonsentrasi pada daerah slit tanpa pelelehan signifikan pada flange maupun end plate. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan parabolic slit berpotensi meningkatkan kapasitas, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi elemen link pendek pada sistem EBF dibandingkan konfigurasi block slit.

KATA KUNCI: enccentrically braced frame; daktilitas; disipasi energi; link pendek; slit link.

© The Author(s) 2026. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1. PENDAHULUAN

Sistem struktur *Eccentrically Braced Frame* (EBF) merupakan salah satu inovasi penting dalam rekayasa struktur baja karena mampu menggabungkan kekakuan elastis tinggi dari *Concentrically Braced Frame* (CBF) dengan kapasitas disipasi energi dari *Moment Resisting Frame* (MRF) (Lettieri et al., 2023; Mortazavi et al., 2022; Titirla, 2023). Pada konfigurasi EBF, member pengaku disambungkan secara eksentrik terhadap rangka, dengan begitu terbentuklah elemen *link* yang mempunyai peranan penting dalam menahan beban seismik. Elemen *link* pada EBF berfungsi sebagai komponen utama yang diizinkan mengalami deformasi plastis selama gempa, sehingga energi seismik dapat terserap tanpa merusak komponen struktural utama (Pangestuti & Suswanto, 2021; (Pangestuti & Suswanto, 2021; Rafael & Lukas, 2020), 2020).

Link dikategorikan menjadi pendek, menengah, dan panjang berdasarkan rasio kapasitas momen terhadap kapasitas geser (M_P/V_P). *Link* pendek lebih disukai karena memiliki kurva histeresis yang stabil dan daktilitas tinggi, meskipun *link* panjang memberikan keuntungan arsitektural berupa bukaan yang lebih besar (Askariani & Garivani, 2020; Li et al., 2022; Mansouri, 2021).

Permasalahan utama yang dihadapi adalah konsentrasi tegangan tinggi pada ujung *link* konvensional yang memicu keruntuhan lokal dan mempercepat degradasi kekakuan (Li et al., 2022; Özkılıç, 2022). Kondisi ini menurunkan efektivitas EBF sebagai sistem struktur tahan gempa. Oleh karena itu, diperlukan inovasi desain *link* yang mampu mengendalikan distribusi tegangan dan memperpanjang kapasitas rotasi inelastis (Hasanoğlu et al., 2023).

Studi terdahulu telah mengembangkan konsep *Steel Slit Damper* (SSD) yang membagi pelat baja menjadi beberapa segmen melalui celah (*slit*), sehingga deformasi plastis terdistribusi lebih merata (Ahmadie Amiri et al., 2018, 2020; Rousta et al., 2022). Namun, sebagian besar penelitian masih terbatas pada aplikasi SSD di sistem MRF, *shear wall*, atau *bracing* (Chu et al., 2020; Rodríguez-Moreno et al., 2025; B. Zhao et al., 2021; X. Zhao & Qi, 2022; Zhong et al., 2025).

Penelitian numerik menunjukkan bahwa geometri *slit*, baik bentuk *block* maupun *parabolic*, berpengaruh signifikan terhadap kapasitas geser, daktilitas, dan disipasi energi (Hwang et al., 2024; Keykhosro Kiani et al., 2020; Mianji et al., 2024). Model *parabolic slit* terbukti menghasilkan distribusi tegangan lebih merata dan kurva histeresis lebih stabil dibandingkan *block slit* (Olia & Saffari, 2024; Xu et al., 2022). Bukti ini memperkuat hipotesis bahwa modifikasi geometri *slit link* dapat meningkatkan performa seismik EBF.

Indonesia sebagai negara dengan intensitas gempa tinggi membutuhkan sistem struktur baja yang tidak hanya kuat tetapi juga ekonomis dan mudah diperbaiki. Penerapan *slit link* berbasis profil WF pada sistem EBF diharapkan dapat menjadi solusi yang relevan untuk konteks lokal, mengingat kebutuhan akan struktur tahan gempa yang efisien dan berkelanjutan (Balik et al., 2021; Bu et al., 2021; Rafael & Lukas, 2020).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji perilaku *steel slit damper* dan *slit link* pada sistem struktur baja, kajian mengenai *slit link* berbasis profil *Wide Flange* (WF) untuk kategori *link* pendek pada sistem EBF masih sangat terbatas. Selain itu, belum banyak penelitian yang membandingkan secara langsung kinerja *block slit* dan *parabolic slit* dengan parameter jarak antar *slit* yang berbeda di bawah pembebanan siklik berdasarkan protokol (ANSI/AISC 341-22, 2022). Kebaharuan penelitian ini terletak pada evaluasi komprehensif terhadap pengaruh variasi geometri *slit* (*block* dan *parabolic*) serta jarak antar *slit* terhadap kapasitas geser, daktilitas, dan disipasi energi pada kategori *link* pendek.

Dengan demikian, penelitian ini memperluas *state of the art slit link* dan memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan desain struktur baja tahan gempa yang lebih efisien dan mudah diperbaiki, serta membuka peluang penelitian lanjutan berupa validasi eksperimental dan pengembangan model analitik prediktif.

2. METODE

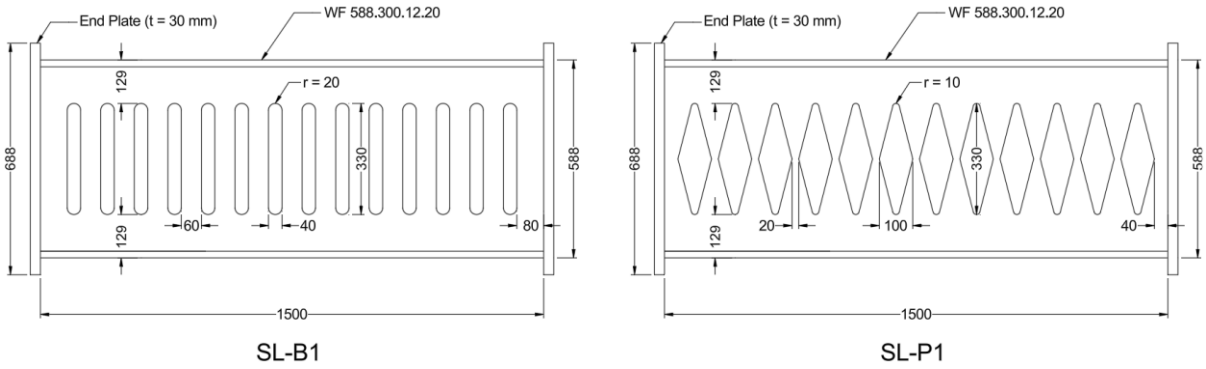
2.1 Material dan Penampang

Material baja yang digunakan adalah ASTM-A36 dengan f_y = 245 MPa, f_u = 470 MPa, E = 210,000 MPa, berat jenis = 7,850 kg/m^3, regangan maksimum (e) = 16%, nilai *poisson's ratio* = 0.3, dan penampang balok *slit link* yang digunakan adalah profil WF 588x300x12x20 dengan balok tepi (*end plate*) berdimensi 300x688x30 mm.

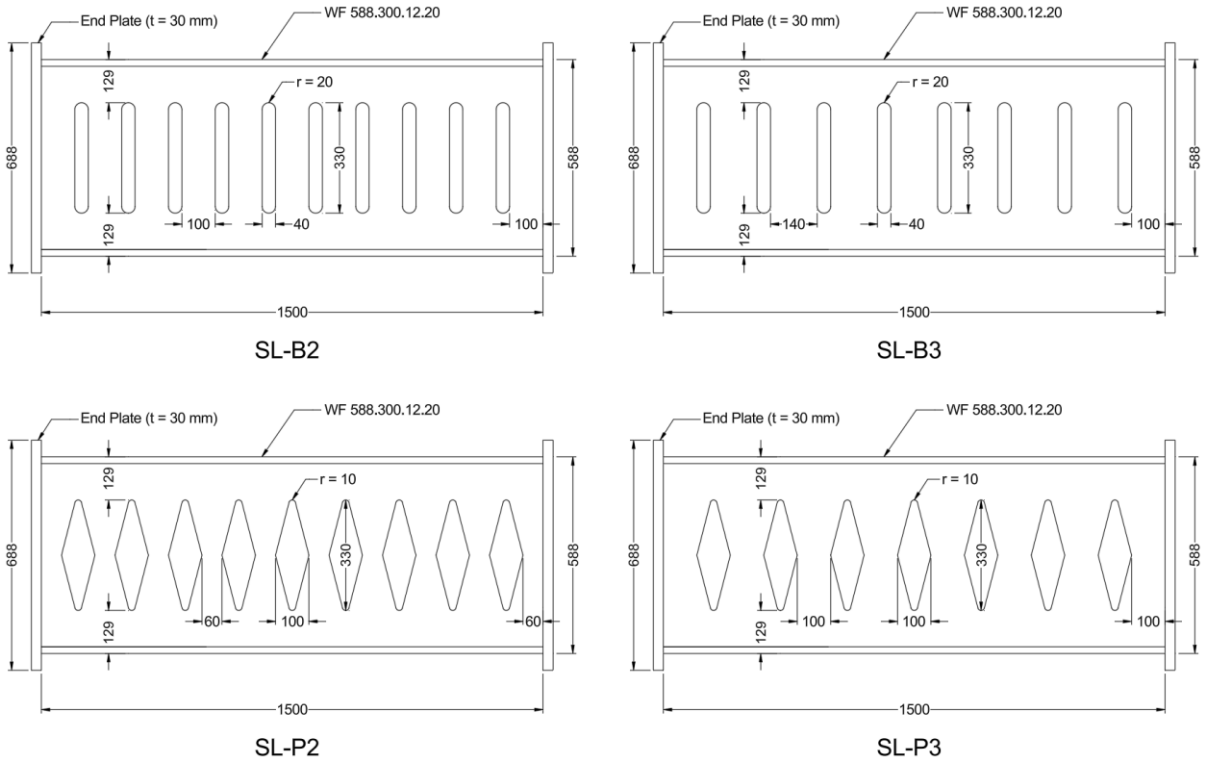
2.2 Konfigurasi Balok *Slit Link*

Model spesimen balok *slit link* mengacu dari penelitian yang dilakukan oleh (Rafael et al., 2026) terhadap rangka EBF dengan kategori *link* pendek yaitu pada model SL-2 (menjadi SL-B1) untuk mewakili model *block slit link* dan SL-04 (menjadi SL-P1) untuk mewakili model *parabolic slit link* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pemililhan kedua model ini karena memilki nilai tegangan dan perilaku keruntuhan yang saling berimpitan. Selanjutnya dari kedua model tersebut dikembangkan dalam beberapa variasi jarak antar *slit* dengan tetap mempertahankan geometri *slit* yang ada seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.

Panjang balok link yang digunakan sebesar 1,500 mm dengan setiap tepi balok diberikan pelat tepi (*end plate*).



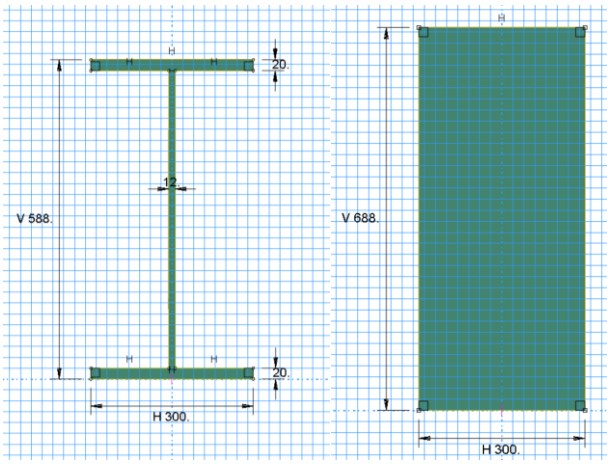
Gambar 1. Geometri dasar untuk *block slit* dan *parabolic slit* (Rafael et al., 2026)



Gambar 2. Pengembangan model slit link dengan variasi jarak antar *slit*

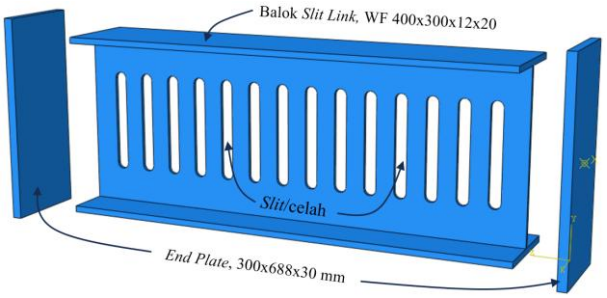
2.3 Pemodelan Numerik

Model numerik dibuat menggunakan *software* abaqus dengan komponen yang dimodelkan adalah balok *slit link* dan pelat tepi (*end plate*). Setiap komponen menggunakan model *3D Solid* dengan tipe *Deformable* dengan dimensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pemilihan material menggunakan *isotropic* sebagai definisi perilaku elastis dan *isotropic hardening* untuk perilaku plastis.



(a) (b)

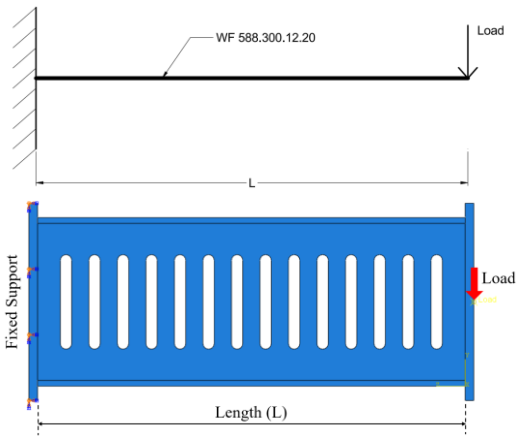
Gambar 3. Dimensi (a) balok *slit link*, (b) *end plate*



Gambar 4. Model spesimen balok *slit link* pada tahapan *assembly*

2.4 *Boundary Condition*, Pembebanan dan *Meshing*

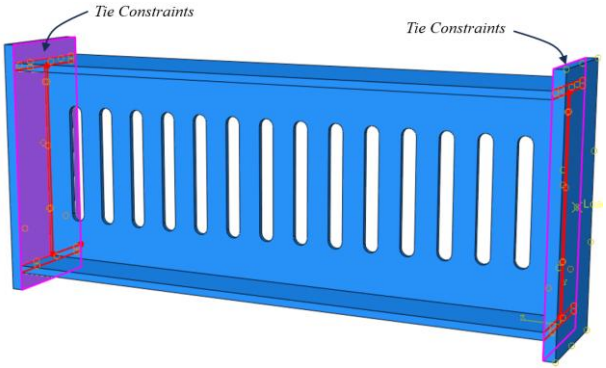
Gambar 5 menunjukkan kondisi batas (*boundary condition*) yang diterapkan pada spesimen yaitu perletakkan jepit pada salah satu sisi *end plate*, serta sisi *end plate* lainnya diberikan beban tegak lurus sumbu netral balok. Hubungan antara *end plate* dengan balok *slit link* diberikan sebagai *tie constraint* untuk asumsi sambungan las (Gambar 6). Untuk beban yang diterapkan adalah beban siklik quasi-statik (*displacement-controlled*) yaitu beban perpindahan bolak-balik yang secara bertahap meningkat dengan total 80 siklus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 untuk melihat nilai tegangan-regangan, distribusi tegangan-regangan, mekanisme keruntuhan serta kapasitas balok *slit link*.



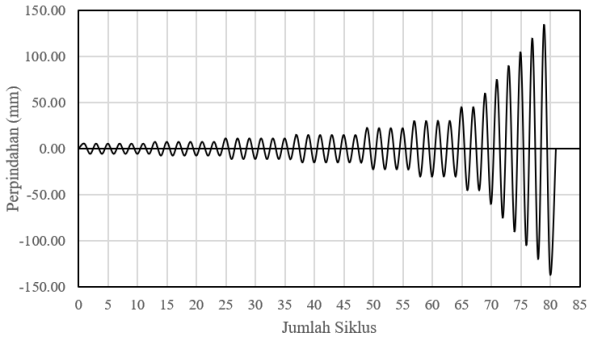
Gambar 5. *Boundary condition* dan posisi beban

Selain pembebanan siklik, untuk melihat daktilitas dari *slit link*, maka diterapkan juga pembebanan monotonik dengan kontrol perpindahan (*displacement-controlled monotonic loading*) pada masing-masing model *slit link* dengan besarnya perpindahan sama dengan nilai perpindahan maksimum pada beban siklik. Hasil yang diperoleh berupa kurva *backbone* akan memberikan informasi yang lebih jelas mengenai kekakuan awal, titik awal pelelehan (*yield point*), kapasitas gaya maksimum, deformasi ultimit, serta perilaku pasca-leleh (*post-yield behavior*).

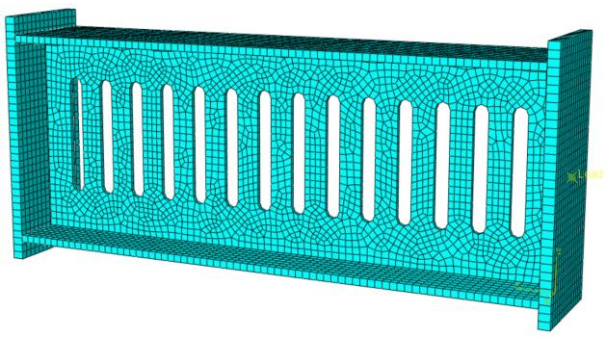
Meshing yang diterapkan pada model adalah bentuk *hexagonal* dengan lebar acuan 20 mm yang diterapkan pada semua komponen, khusus pola *meshing* pada area pelat badan (*web*) mengikuti pola standar yang dibuat oleh abaqus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 6. T*ie constraints* pada hubungan balok *slit link – end plate*



Gambar 7. Nilai beban perpindahan berdasarkan *loading protocol* AISC 341-22



Gambar 8. Pola *meshing*

2.5 Kekakuan Awal

Kekakuan awal (*initial stiffness*) merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi respons elastis awal struktur terhadap pembebanan. Parameter ini menunjukkan kemampuan elemen *slit link* dalam menahan deformasi pada tahap awal pembebanan

sebelum terjadi pelelehan material. Nilai kekakuan awal yang lebih tinggi menunjukkan bahwa struktur memiliki resistensi yang lebih besar terhadap perpindahan sehingga deformasi awal yang terjadi relatif lebih kecil.

Pada penelitian ini, kekakuan awal ditentukan berdasarkan kemiringan (*slope*) bagian elastis awal dari kurva backbone. Nilai kekakuan awal dihitung menggunakan rasio antara gaya leleh dan perpindahan leleh sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$K_0 = \frac{F_y}{\Delta_y} \quad (1)$$

dimana K_0 adalah kekakuan awal, F_y adalah *force* saat awal pelelehan (kN), dan Δ_y adalah *displacement* saat awal pelelehan (mm).

2.6 Daktilitas

Daktilitas diperoleh berdasarkan kurva *backbone* kemudian diidealisasi menjadi kurva bilinear mengacu pada FEMA 356 untuk memperoleh titik leleh ekuivalen (*yield* point). Perpindahan leleh (Δ_y) ditentukan dari titik perpotongan garis elastis awal dengan garis pasca-leleh hasil idealisasi bilinear, sedangkan perpindahan ultimit (Δ_u) ditentukan pada saat kapasitas maksimum tercapai sebelum terjadi penurunan kapasitas yang signifikan. Faktor daktilitas dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$\mu = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \quad (2)$$

dimana Δ_y adalah *displacement* saat awal pelelehan dan $\Delta_u$adalah *displacement* maksimum sebelum terjadi penurunan kapasitas.

2.7 *Relative Energy Dissipation Factor* (REDF)

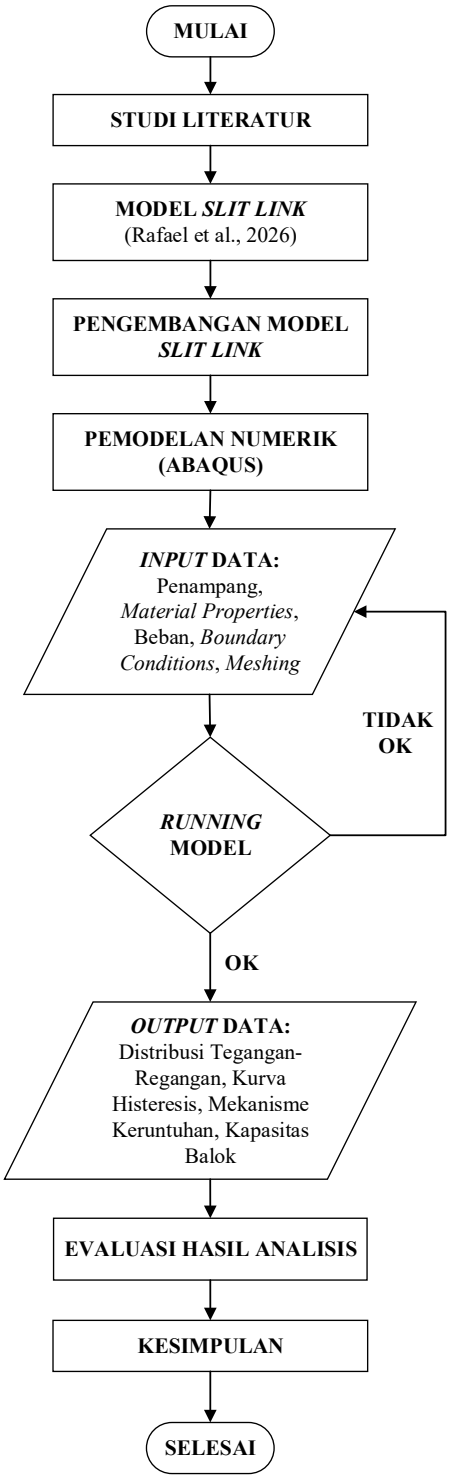
Relative Energy Dissipation Factor (REDF) merupakan indikator relatif kemampuan disipasi energi antar model *slit link* yang dihitung menggunakan hubungan antara faktor daktilitas dan rasio kapasitas ultimit terhadap kapasitas leleh yang diberikan pada Persamaan 3.

$$RDEF = \mu \frac{F_u}{F_y} \quad (3)$$

dimana μ adalah daktilitas, $F_u$adalah *force* saat ultimit (kN),dan F_y adalah *force* saat awal pelelehan (kN).

2.8 Diagram Alir Penelitian

Keseluruhan tahapan dan proses penelitian dirangkum dalam diagram alir penelitian yang diberikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram alir penelitian

Data hasil analisis diolah dalam bentuk kurva hubungan perpindahan–gaya (*displacement vs force*) untuk setiap model pada pembebanan monotonik dan siklik. Selain itu, distribusi tegangan dan regangan serta pola mekanisme keruntuhan untuk keenam spesimen diamati dari kontur tegangan hingga tercapai kondisi leleh dan keruntuhan lokal pada area *slit*. Perbandingan kurva gaya–perpindahan, distribusi tegangan-regangan, dan mekanisme keruntuhan antar variasi jarak *slit* digunakan untuk menilai pengaruh

konfigurasi *slit* terhadap kapasitas, kekakuan, daktilitas, dan perilaku keruntuhan balok *slit link*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Tegangan dan Mekanisme Keruntuhan

Berdasarkan Gambar 10 hingga Gambar 15, seluruh model menunjukkan pola distribusi tegangan yang terkonsentrasi pada daerah sekitar *slit*, khususnya pada ujung bukaan yang mengalami perubahan geometri secara tiba-tiba. Pada tahap awal pembebanan, tegangan *von Mises* meningkat secara bertahap hingga mencapai tegangan leleh material sebesar 245 MPa. Setelah kondisi leleh tercapai, daerah plastis mulai berkembang dari ujung *slit* menuju bagian *web* di sekitarnya seiring dengan bertambahnya perpindahan.

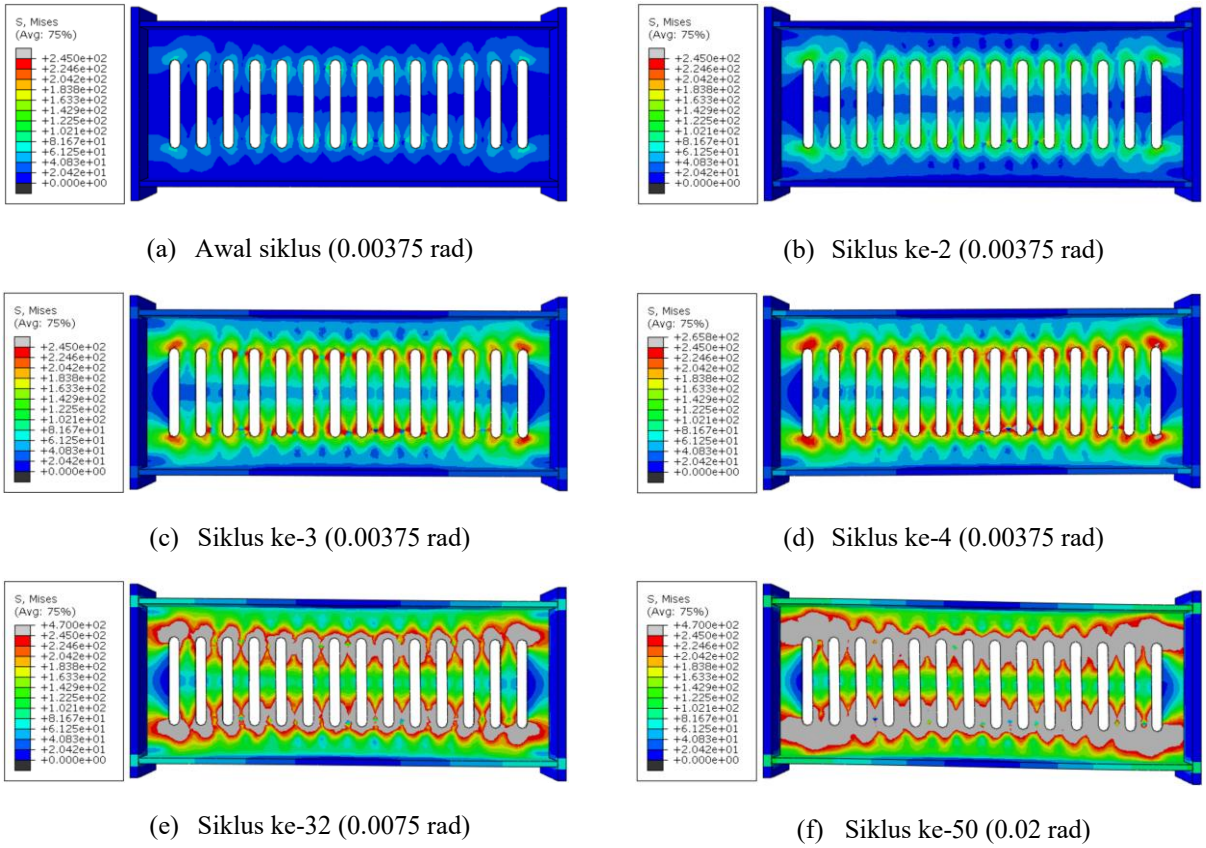
Pada Gambar 10(a), 11(a), dan 12(a), memperlihatkan kondisi awal (0.00375 rad) pada *block slit link* beban terdisitribusi mulai dari ujung *slit* (radius *slit*). Siklus 2 *block slit link* yang disajikan pada Gambar 10(b), 11(b), dan 12 (b) mengalami rotasi *link* 0.00375 rad masih dalam kondisi elastis di mana rentang tegangan maksimumnya 163.30 MPa hingga 224.60 MPa. Siklus 3 *block slit link* dengan rotasi 0.00375 rad yang terjadi pada Gambar 10(c), 11(c), dan 12(c) menunjukan potensi *local buckling* yang berpusat di sekitaran *slit* di mana tegangan maksimum yang terjadi sama dengan tegangan leleh (f_y = 245 MPa). Siklus 4 *block slit link* yang terdapat pada Gambar 10(d), 11(d), dan 12(d) dengan rotasi 0.00375 rad menunjukan bahwa *block slit link* memasuki fase plastis yang dimulai dari ujung *slit* dengan *range* tegangan 245.60 MPa hingga 267.40 MPa. Pada kondisi rotasi 0.0075 dengan siklus yang bervarian seperti pada Gambar 10(e), 11(e), dan 12 (e) menunjukan gejala kegagalan struktur pertama yang terjadi pada ujung *slit* dengan tegangan maksimum yang terjadi sebesar tegangan ultimit (f_u = 470 MPa). Lalu pada siklus ke-50 (0.02 rad) yang ditunjukan pada Gambar 10(f), 11(f), dan 12(f) kegagaan struktur merambat dari *slit link* menuju ujung sambungan *end plate*.

Untuk kondisi *parabolic stil link* dimulai dari kondisi siklus awal disajikan pada Gambar 13(a), 13(b), dan 13(c) dengan rotasi *link* 0.00375 rad. Siklus 2 *parabolic slit link* yang disajikan pada Gambar 13(b), 14(b), dan 15 (b) mengalami rotasi *link* 0.00375 rad masih dalam kondisi elastis di mana rentang tegangan maksimumnya 163.30 MPa hingga 204.20 MPa. Siklus 3 *parabolic slit link* dengan rotasi 0.00375 rad yang terjadi pada Gambar 13(c), 14(c), dan 15(c) menunjukan potensi *local buckling* yang tersebar di sekeliling *slit* di mana tegangan maksimum yang terjadi sama dengan tegangan leleh (f_y = 245 MPa). Siklus 4 *parabolic slit* l*ink* yang terdapat pada Gambar 13(d), 14(d), dan 15(d) dengan rotasi 0.00375 rad menunjukan bahwa *parabolic slit link* memasuki fase plastis yang dimulai dari ujung *slit* lalu merambat ke sepanjang tepi *slit* dengan *range* tegangan 252.20 MPa hingga 272.30 MPa. Pada kondisi rotasi 0.0075 dengan siklus yang bervarian seperti pada Gambar 13(e), 14(e), dan 15 (e) menunjukan gejala kegagalan struktur pertama yang terjadi pada sepanjang tepi *slit* dengan tegangan maksimum yang terjadi sebesar tegangan ultimit (f_u = 470 MPa). Lalu pada siklus ke-50 (0.02 rad) yang ditunjukan pada Gambar 13(f), 14(f), dan 15(f) kegagaan struktur merambat dari *slit link* menuju ujung sambungan *end plate*.

Dari hasil numerik yang didapat bahwa geometri *parabolic slit* mampu mengurangi *stress concentration* dibandingkan *block slit*, sehingga menghasilkan perilaku keruntuhan yang lebih stabil. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Xu et al., 2022) dan (Olia & Saffari, 2024) yang menunjukkan bahwa geometri *slit* berbentuk *parabolic* mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata dibandingkan geometri *slit* berbentuk *block*. Selain itu, (Kiani et al., 2020) melaporkan bahwa modifikasi bentuk *slit* dapat meningkatkan kapasitas disipasi energi dan memperlambat degradasi kekakuan akibat pembebanan siklik. Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut, di mana model *parabolic slit* menunjukkan pola penyebaran tegangan yang lebih merata serta mekanisme keruntuhan yang lebih gradual dibandingkan model *block slit*.

Mekanisme keruntuhan seluruh model diawali oleh terbentuknya zona plastis pada ujung *slit* yang kemudian berkembang secara progresif menuju bagian tengah *web*. Seiring bertambahnya deformasi, area plastis semakin meluas hingga mencapai kondisi ultimit. Tidak ditemukan indikasi terjadinya pelelehan signifikan pada *flange* maupun elemen di luar daerah *slit*, yang menunjukkan bahwa mekanisme disipasi energi berhasil dikonsentrasikan pada elemen *link* sesuai konsep desain *Eccentrically Braced Frame* (EBF).

Hasil penelitian ini sejalan dengan (Xu et al., 2022) yang melaporkan bahwa geometri *slit* dengan transisi lengkung mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih seragam dibandingkan *slit* berbentuk persegi atau bersudut tajam. Temuan serupa juga dilaporkan oleh (Olia & Saffari, 2024), yang menunjukkan bahwa modifikasi geometri *slit* dapat mengurangi konsentrasi tegangan lokal serta meningkatkan stabilitas perkembangan zona plastis selama pembebanan. Selain itu, (Kiani et al., 2020) menyatakan bahwa peningkatan luas efektif penampang *web* pada *slit damper* berkontribusi langsung terhadap peningkatan kapasitas geser dan kemampuan menahan deformasi pasca-leleh.

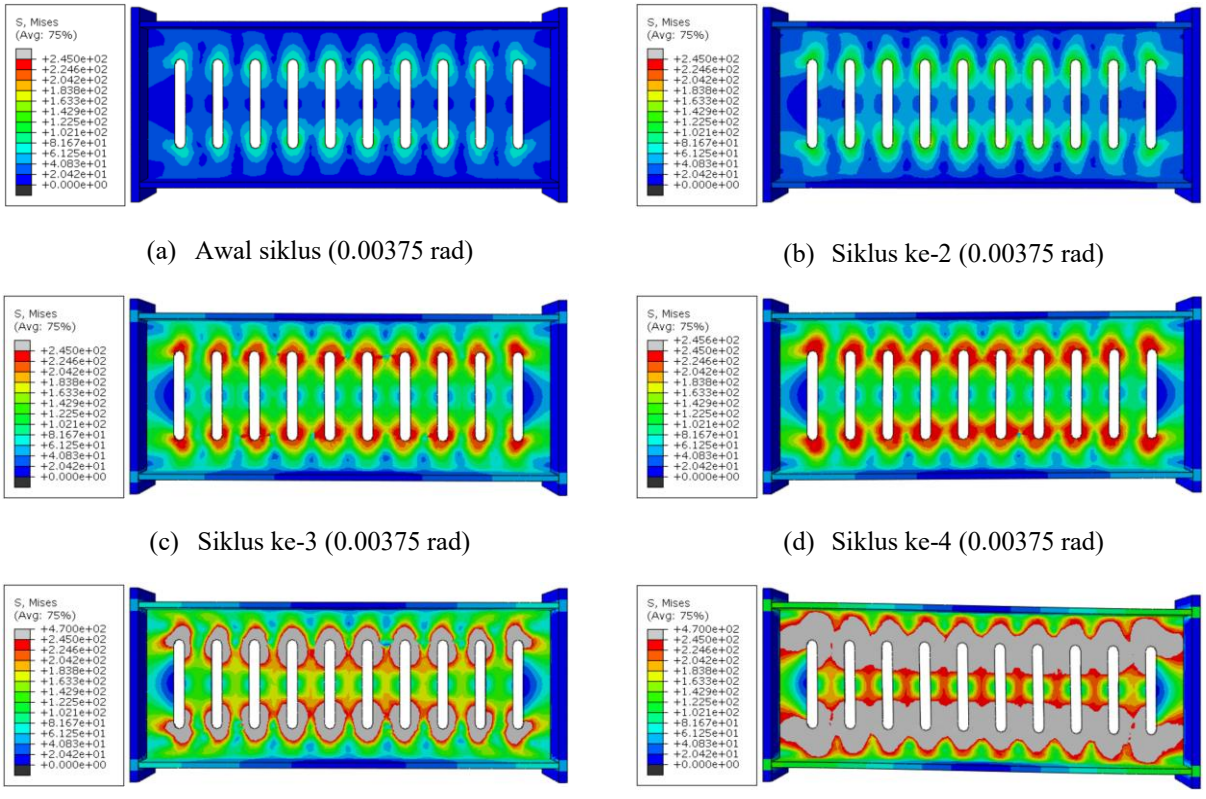


(a) Awal siklus (0.00375 rad) (b) Siklus ke-2 (0.00375 rad)

(c) Siklus ke-3 (0.00375 rad) (d) Siklus ke-4 (0.00375 rad)

(e) Siklus ke-32 (0.0075 rad) (f) Siklus ke-50 (0.02 rad)

Gambar 10. Deformasi dan distribusi tegangan pada model SL-B1

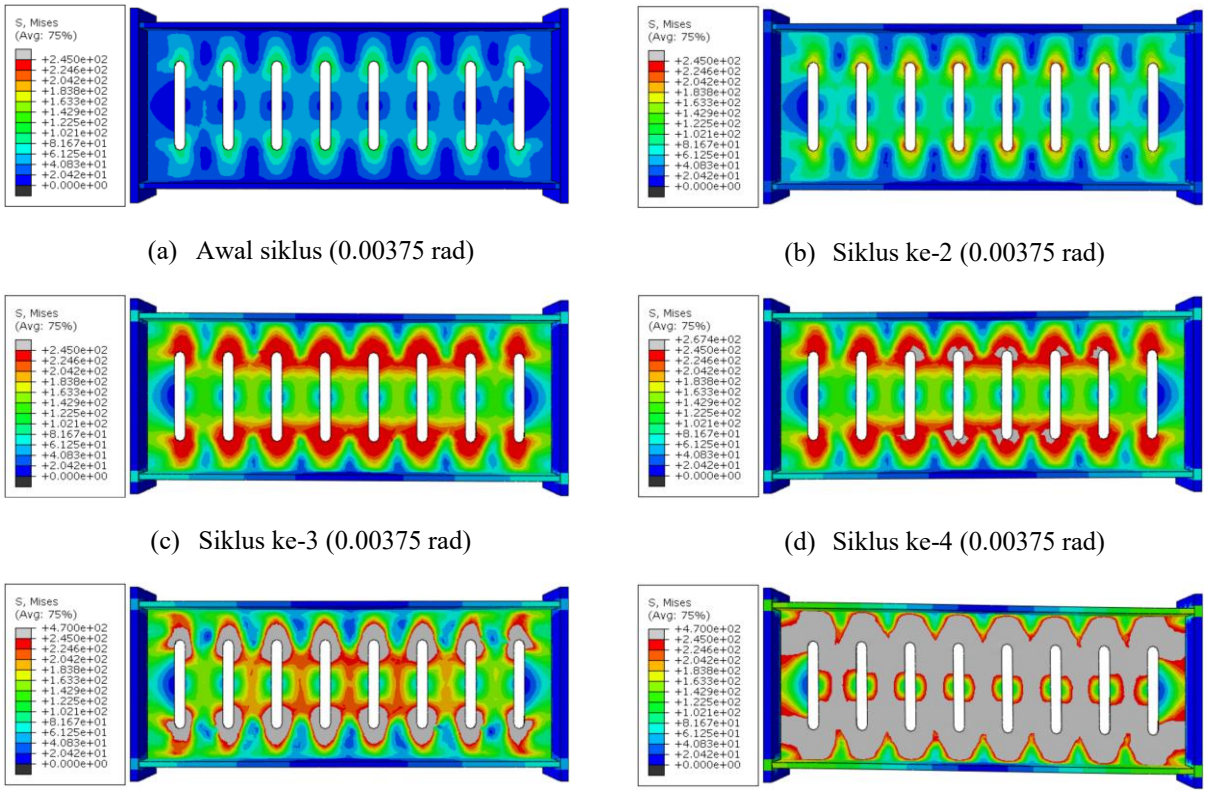


(a) Awal siklus (0.00375 rad) (b) Siklus ke-2 (0.00375 rad)

(c) Siklus ke-3 (0.00375 rad) (d) Siklus ke-4 (0.00375 rad)

(e) Siklus ke-26 (0.0075 rad) (f) Siklus ke-50 (0.02 rad)

Gambar 11. Deformasi dan distribusi tegangan pada model SL-B2

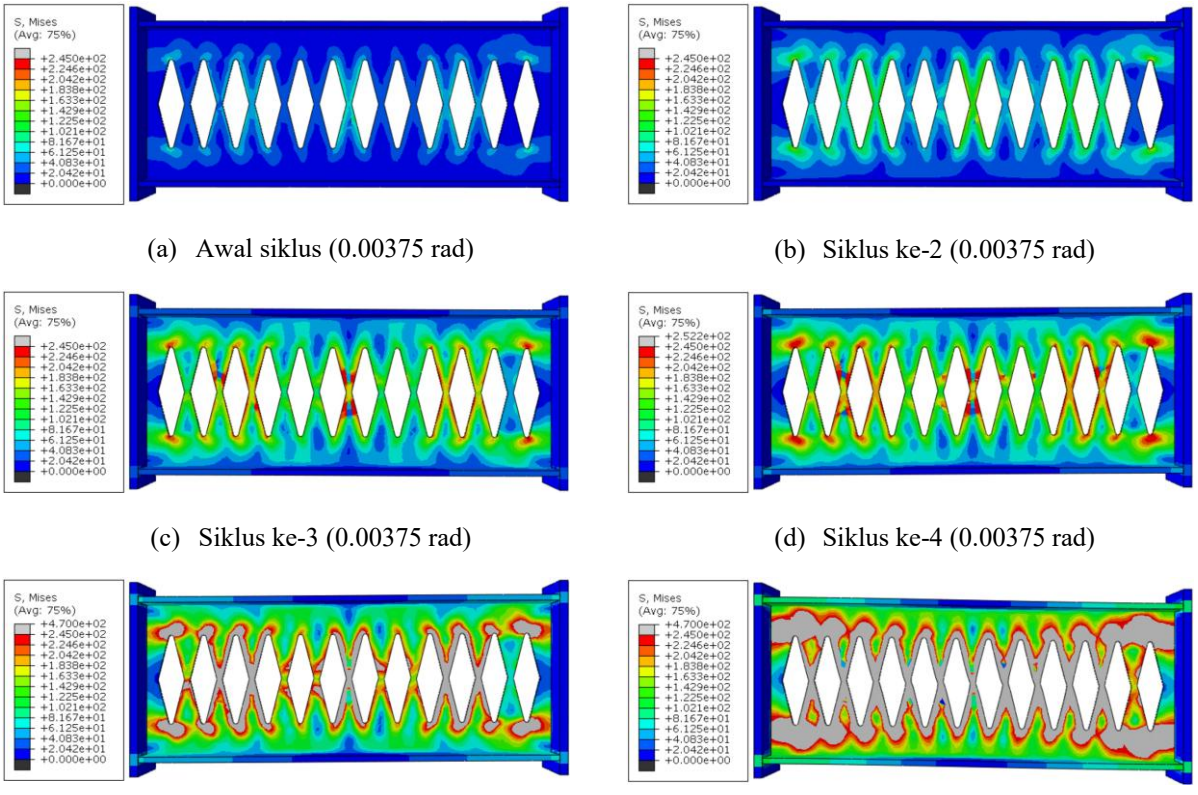


(a) Awal siklus (0.00375 rad) (b) Siklus ke-2 (0.00375 rad)

(c) Siklus ke-3 (0.00375 rad) (d) Siklus ke-4 (0.00375 rad)

(e) Siklus ke-26 (0.0075 rad) (f) Siklus ke-50 (0.02 rad)

Gambar 12. Deformasi dan distribusi tegangan pada siklus model SL-B3

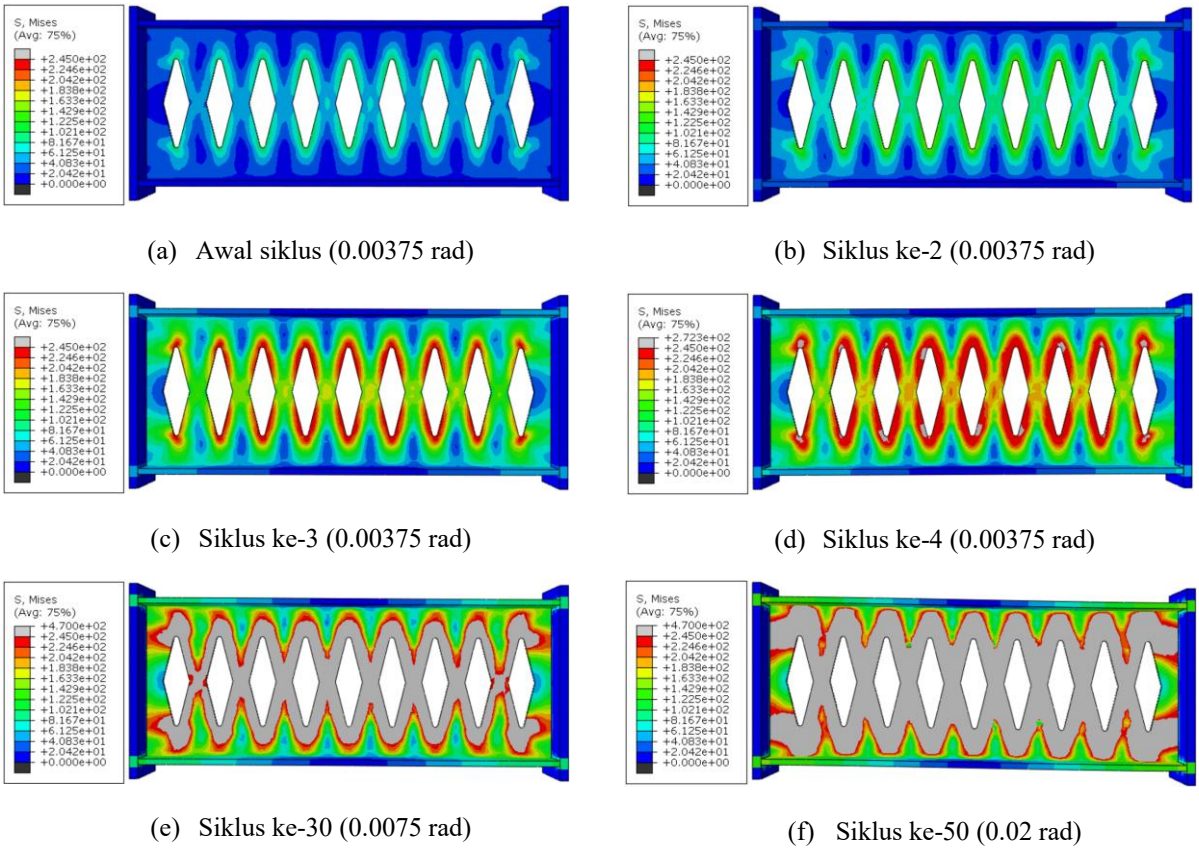


(a) Awal siklus (0.00375 rad) (b) Siklus ke-2 (0.00375 rad)

(c) Siklus ke-3 (0.00375 rad) (d) Siklus ke-4 (0.00375 rad)

(e) Siklus ke-29 (0.0075 rad) (f) Siklus ke-50 (0.02 rad)

Gambar 13. Deformasi dan distribusi tegangan pada model SL-P1

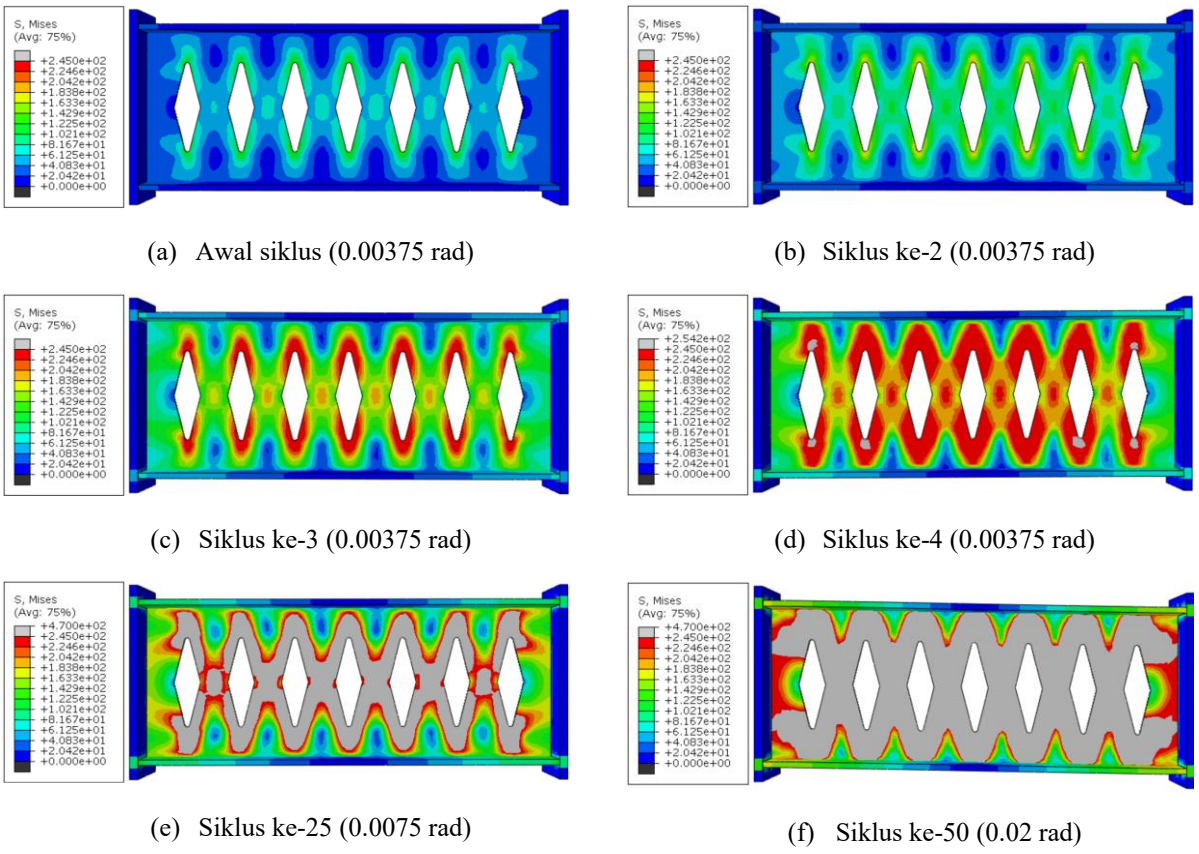


(a) Awal siklus (0.00375 rad) (b) Siklus ke-2 (0.00375 rad)

(c) Siklus ke-3 (0.00375 rad) (d) Siklus ke-4 (0.00375 rad)

(e) Siklus ke-30 (0.0075 rad) (f) Siklus ke-50 (0.02 rad)

Gambar 14. Deformasi dan distribusi tegangan pada model SL-P2



(a) Awal siklus (0.00375 rad) (b) Siklus ke-2 (0.00375 rad)

(c) Siklus ke-3 (0.00375 rad) (d) Siklus ke-4 (0.00375 rad)

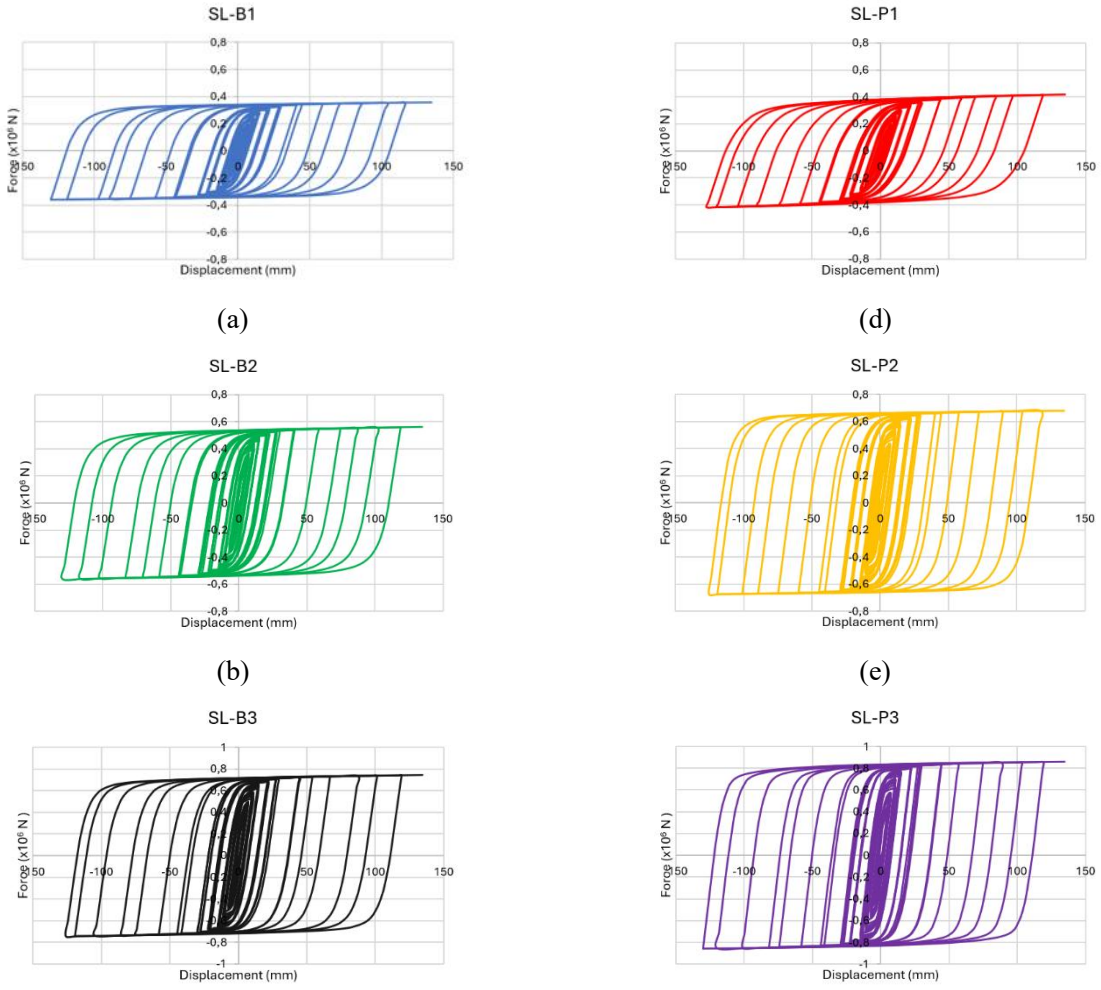
(e) Siklus ke-25 (0.0075 rad) (f) Siklus ke-50 (0.02 rad)

Gambar 15. Deformasi dan distribusi tegangan pada model SL-P3

Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi geometri *slit* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tegangan dan mekanisme keruntuhan elemen *link*. Konfigurasi *parabolic slit*, khususnya model SL-P3, menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata, kapasitas ultimit yang lebih tinggi, serta perkembangan deformasi plastis yang lebih stabil dibandingkan konfigurasi *block slit*. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan geometri *parabolic slit* berpotensi meningkatkan performa seismik elemen *link* pada sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF).

3.2 Respon Histeresis

Berdasarkan Gambar 16, seluruh model menunjukkan pola histeresis yang relatif stabil hingga mencapai kondisi ultimit. Namun demikian, terdapat perbedaan yang signifikan pada kapasitas gaya maksimum yang dihasilkan oleh masing-masing model. Pada kelompok *block slit*, kapasitas gaya maksimum meningkat dari 148.44 kN pada model SL-B1 menjadi 261.76 kN pada model SL-B2 dan mencapai 360.53 kN pada model SL-B3. Sementara itu, pada kelompok *parabolic slit*, kapasitas gaya maksimum meningkat dari 147.01 kN pada model SL-P1 menjadi 309.59 kN pada model SL-P2 dan mencapai nilai tertinggi sebesar 411.93 kN pada model SL-P3.



Gambar 16. Kurva histeresis *displacement vs force*

Peningkatan kapasitas gaya maksimum tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya jarak antar imenyebabkan luas efektif penampang iyang berfungsi menahan gaya geser menjadi lebih besar. Akibatnya, kapasitas geser elemen meningkat dan struktur mampu mempertahankan respons pasca-leleh pada tingkat pembebanan yang lebih tinggi. Selain itu, model *parabolic slit* secara konsisten menghasilkan kapasitas gaya yang lebih besar dibandingkan model *block slit* pada konfigurasi yang setara. Sebagai contoh, model SL-P3 menghasilkan kapasitas gaya maksimum sebesar 411.93 kN atau sekitar 14.3% lebih tinggi dibandingkan model SL-B3 yang hanya mencapai 360.53 kN.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa geometri *parabolic slit* mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata sehingga konsentrasi tegangan lokal pada ujung *slit* dapat dikurangi. Kondisi ini memungkinkan perkembangan deformasi plastis berlangsung lebih stabil dan memperlambat degradasi kekakuan selama pembebanan siklik. Fenomena tersebut juga terlihat dari bentuk kurva histeresis model *parabolic slit* yang cenderung lebih penuh (*full hysteretic loops*) dibandingkan model *block slit*.

Hasil penelitian ini sejalan dengan (Xu et al., 2022) yang melaporkan bahwa geometri *slit* berbentuk *parabolic* mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada area bukaan sehingga menghasilkan distribusi tegangan yang lebih seragam dibandingkan geometri *block slit*. Temuan serupa juga dilaporkan oleh (Olia & Saffari, 2024) yang menunjukkan bahwa modifikasi geometri *slit* dapat meningkatkan stabilitas respons pasca-leleh dan memperbaiki performa histeresis elemen baja tahan gempa. Selain itu, (Hwang et al., 2024; Mianji et al., 2024)) melaporkan bahwa distribusi deformasi plastis yang lebih merata menghasilkan kurva histeresis yang lebih stabil, kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi, serta degradasi kekakuan yang lebih lambat selama pembebanan siklik.

Dengan demikian, hasil penelitian ini mengkonfirmasi bahwa geometri *parabolic slit* memberikan performa siklik yang lebih baik dibandingkan *block slit*. Model SL-P3 menunjukkan respons histeresis paling unggul dengan kapasitas gaya maksimum tertinggi sebesar 411.93 kN, yang selanjutnya berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas deformasi, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi relatif pada sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF).

Meskipun kurva histeresis mampu menggambarkan stabilitas respons siklik dan perkembangan deformasi plastis selama pembebanan berulang, evaluasi performa struktur secara lebih komprehensif memerlukan analisis terhadap parameter kekakuan awal, kapasitas leleh, kapasitas ultimit, dan kapasitas deformasi. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya difokuskan pada evaluasi kekakuan awal dan kurva backbone yang diperoleh dari hasil pembebanan monotonik untuk mengidentifikasi pengaruh variasi geometri slit terhadap karakteristik mekanik masing-masing model

3.3 Kurva *Backbone* dan Kapasitas Deformasi

Berdasarkan Gambar 17 dan Tabel 1, seluruh model menunjukkan respons elastis pada tahap awal pembebanan yang ditandai oleh hubungan linier antara gaya dan perpindahan. Setelah mencapai kondisi leleh, kurva mengalami perubahan kemiringan yang menunjukkan terbentuknya deformasi plastis pada daerah *slit*. Fenomena ini konsisten dengan hasil distribusi tegangan yang menunjukkan bahwa pelelehan pertama kali terjadi pada ujung *slit* akibat konsentrasi tegangan yang tinggi.

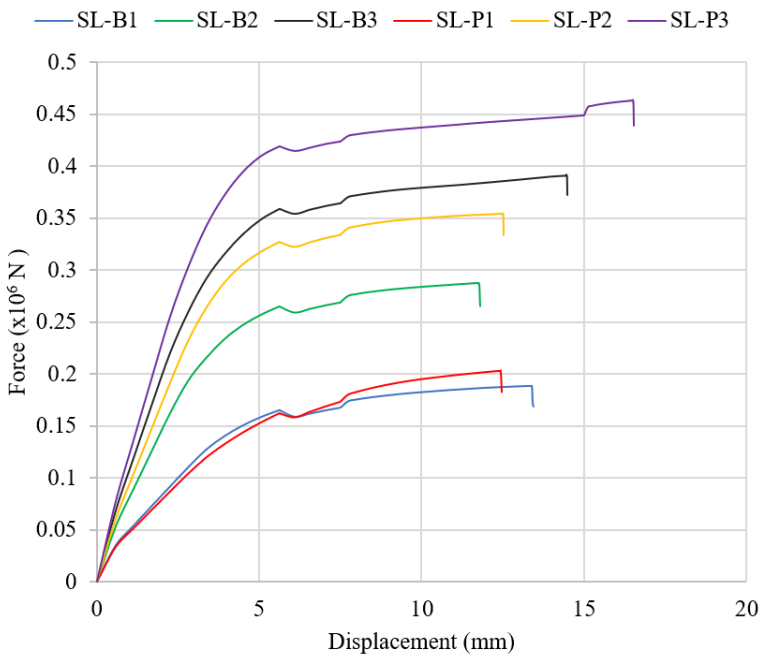
Pada kelompok *block slit*, kapasitas ultimit meningkat dari 188.49 kN pada model SL-B1 menjadi 289.19 kN pada model SL-B2 dan mencapai 391.03 kN pada model SL-B3. Peningkatan kapasitas ini menunjukkan bahwa bertambahnya jarak antar *slit* menyebabkan luas efektif penampang *web* meningkat sehingga kemampuan elemen dalam menahan gaya geser menjadi lebih besar.

Perilaku serupa juga ditunjukkan oleh kelompok *parabolic slit*. Kapasitas ultimit meningkat dari 201.39 kN pada model SL-P1 menjadi 353.22 kN pada model SL-P2 dan mencapai nilai tertinggi sebesar 456.45 kN pada model SL-P3. Selain memiliki kapasitas gaya maksimum terbesar, model SL-P3 juga menunjukkan kapasitas deformasi tertinggi dengan perpindahan ultimit sebesar 16.50 mm.

Jika dibandingkan dengan hasil kurva histeresis pada Gambar 16, model-model *parabolic slit* menunjukkan respons pasca-leleh yang lebih stabil dibandingkan model *block slit*. Stabilitas tersebut menunjukkan bahwa distribusi tegangan yang lebih merata pada geometri *parabolic slit* mampu mengurangi konsentrasi tegangan lokal sehingga perkembangan deformasi plastis berlangsung lebih bertahap.

Secara keseluruhan, kurva *backbone* menunjukkan bahwa peningkatan jarak antar *slit* berpengaruh positif terhadap kapasitas gaya maksimum dan kapasitas deformasi. Dari seluruh model yang ditinjau, SL-P3 menunjukkan performa terbaik karena mampu menghasilkan kombinasi kapasitas ultimit dan kapasitas deformasi terbesar dibandingkan model lainnya.

Kapasitas deformasi yang lebih tinggi pada model parabolic *slit* menunjukkan bahwa bentuk *slit* berpengaruh terhadap mekanisme penyebaran tegangan dan perkembangan deformasi plastis. Temuan ini konsisten dengan penelitian (Xu et al., 2022) yang menyatakan bahwa geometri bukaan dengan transisi lengkung mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada ujung bukaan sehingga distribusi deformasi menjadi lebih merata. Penelitian (Olia & Saffari, 2024) juga menunjukkan bahwa modifikasi bentuk *slit* dapat meningkatkan kapasitas pasca-leleh dan memperpanjang fase deformasi inelastis sebelum terjadi kegagalan. Hasil penelitian ini memperlihatkan kecenderungan yang sama, dimana model *parabolic slit* terutama SL-P3 menghasilkan kapasitas gaya maksimum dan kapasitas deformasi ultimit yang lebih tinggi dibandingkan model *block slit*.



Gambar 17. Kurva *backbone*

Tabel 1. Parameter *backbone*

Model	F_y (kN)	Δ_y (mm)	F_u (kN)	Δ_u (mm)	K_0	μ	F_u/F_y	REDF
SL-B1	165.27	5.62	188.49	13.40	29.41	2.38	1.14	2.72
SL-B2	264.73	5.62	289.19	11.80	47.10	2.10	1.09	2.29
SL-B3	359.09	5.62	391.03	14.50	63.89	2.58	1.09	2.81
SL-P1	162.24	5.62	201.39	12.40	28.87	2.21	1.24	2.74
SL-P2	327.08	5.62	353.22	12.50	58.20	2.22	1.08	2.40
SL-P3	419.34	5.62	456.45	16.50	74.62	2.94	1.09	3.20

3.4 Kekakuan Awal (*Initial Stiffeness*)

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1, nilai kekakuan awal menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya jarak antar *slit* pada kedua konfigurasi yang ditinjau. Pada kelompok *block slit*, nilai kekakuan awal meningkat dari 29.41 kN/mm pada model SL-B1 menjadi 47.10 kN/mm pada model SL-B2 dan mencapai 63.89 kN/mm pada model SL-B3. Pola yang sama juga terjadi pada kelompok *parabolic slit*, dimana nilai kekakuan awal meningkat dari 28.87 kN/mm pada model SL-P1 menjadi 58.20 kN/mm pada model SL-P2 dan mencapai nilai tertinggi sebesar 74.62 kN/mm pada model SL-P3.

Peningkatan kekakuan awal tersebut menunjukkan bahwa berkurangnya jumlah *slit* menyebabkan luas efektif penampang *web* yang berperan dalam menahan gaya geser menjadi lebih besar. Akibatnya, deformasi yang terjadi pada tahap elastis awal menjadi lebih kecil sehingga struktur mampu mempertahankan kekakuannya pada tingkat pembebanan yang lebih tinggi.

Jika dibandingkan antara kedua konfigurasi, model *parabolic slit* secara umum menunjukkan nilai kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan model *block slit* pada jarak antar *slit* yang setara. Kondisi ini mengindikasikan bahwa bentuk *parabolic slit* mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata sehingga deformasi lokal pada daerah *slit* dapat dikurangi. Hasil ini sejalan dengan kontur distribusi tegangan yang menunjukkan penyebaran tegangan yang lebih seragam pada model *parabolic slit* dibandingkan model *block slit*.

Nilai kekakuan awal tertinggi diperoleh pada model SL-P3 sebesar 74.62 kN/mm, sedangkan nilai terendah diperoleh pada model SL-P1 sebesar 28.87 kN/mm. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi *parabolic slit* dengan jarak antar *slit* yang lebih besar memberikan respons elastis yang paling baik di antara seluruh model yang dianalisis.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan jarak antar *slit* menyebabkan peningkatan kekakuan awal pada seluruh model yang dianalisis. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Kiani et al., 2020) yang melaporkan bahwa berkurangnya jumlah bukaan pada elemen *slit damper* akan meningkatkan luas efektif penampang sehingga kekakuan elastis awal menjadi lebih tinggi. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Hwang et al., 2024) yang menunjukkan bahwa konfigurasi *slit* dengan luas penampang *web* yang lebih besar mampu meningkatkan kapasitas kekakuan dan mengurangi deformasi awal selama pembebanan. Pada penelitian ini, kecenderungan tersebut terlihat jelas pada model SL-B3 dan SL-P3 yang menghasilkan nilai kekakuan awal tertinggi dibandingkan model lainnya.

3.5 Analisis Daktilitas

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1, nilai daktilitas seluruh model berada pada rentang 2.10 hingga 2.94. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh model mampu mengalami deformasi plastis setelah melewati kondisi leleh sebelum mencapai kondisi ultimit.

Pada kelompok *block slit*, nilai daktilitas meningkat dari 2.38 pada model SL-B1 menjadi 2.58 pada model SL-B3. Meskipun model SL-B2 memiliki kapasitas gaya yang lebih tinggi dibandingkan SL-B1, nilai daktilitasnya justru lebih rendah yaitu sebesar 2.10. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas gaya tidak selalu diikuti oleh peningkatan kemampuan deformasi plastis.

Pada kelompok *parabolic slit*, nilai daktilitas meningkat dari 2.21 pada model SL-P1 menjadi 2.22 pada model SL-P2 dan mencapai nilai tertinggi sebesar 2.94 pada model SL-P3. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi *parabolic slit* mampu mempertahankan kapasitas pasca-leleh dalam rentang deformasi yang lebih panjang dibandingkan konfigurasi *block slit*.

Tingginya nilai daktilitas pada model SL-P3 menunjukkan bahwa distribusi tegangan yang lebih merata pada sepanjang tepi *slit* memungkinkan perkembangan zona plastis yang lebih stabil. Kondisi ini menyebabkan elemen mampu mengalami deformasi yang lebih besar sebelum terjadi kegagalan. Sebaliknya, model dengan nilai daktilitas yang lebih rendah cenderung mengalami konsentrasi tegangan yang lebih tinggi sehingga kapasitas deformasi plastisnya menjadi lebih terbatas.

Hasil analisis daktilitas ini konsisten dengan hasil kurva *backbone* dan kurva histeresis yang menunjukkan bahwa model SL-P3 memiliki kapasitas deformasi ultimit terbesar serta respons pasca-leleh yang paling stabil. Dengan demikian, konfigurasi parabolic slit memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kemampuan deformasi inelastis pada sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF).

Temuan ini konsisten dengan penelitian(Xu et al., 2022) yang melaporkan bahwa geometri *slit* yang memiliki transisi lengkung menghasilkan distribusi tegangan yang lebih seragam dibandingkan *slit* bersudut tajam. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Olia & Saffari, 2024) yang menunjukkan bahwa modifikasi geometri *slit* dapat meningkatkan daktilitas dan kapasitas disipasi energi sistem baja tahan gempa.

Selain itu, (Hwang et al., 2024) menemukan bahwa *slit damper* dengan distribusi deformasi plastis yang lebih merata mampu mempertahankan kapasitas deformasi hingga tahap pasca-leleh. Hasil penelitian ini memperlihatkan kecenderungan yang sama, di mana model *parabolic slit* terutama SL-P3 menunjukkan kapasitas deformasi terbesar dibandingkan model lainnya.

3.6 Analisis *Relative Energy Dissipation Factor* (REDF)

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 1, diperoleh nilai REDF untuk model SL-B1, SL-B2, SL-B3, SL-P1, SL-P2, dan SL-P3 berturut-turut sebesar 2.72, 2.29, 2.81, 2.74, 2.40, dan 3.20. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model SL-P3 memiliki kemampuan disipasi energi relatif tertinggi dibandingkan seluruh model yang dianalisis. Sebaliknya, model SL-B2 menghasilkan nilai REDF terendah sehingga menunjukkan kemampuan disipasi energi yang relatif lebih rendah.

Tingginya nilai REDF pada model SL-P3 dipengaruhi oleh kombinasi kapasitas ultimit yang tinggi (456.45 kN) dan faktor daktilitas terbesar (μ = 2.94). Kondisi ini menunjukkan bahwa geometri parabolic slit dengan jarak antar *slit* yang lebih besar mampu mempertahankan kapasitas beban setelah melewati kondisi leleh sekaligus memberikan kemampuan deformasi inelastis yang lebih baik. Distribusi tegangan yang lebih merata pada sepanjang tepi *slit* menyebabkan perkembangan sendi plastis berlangsung secara bertahap sehingga konsentrasi tegangan lokal dapat dikurangi.

Sebaliknya, model SL-B2 menghasilkan nilai REDF terendah meskipun memiliki kapasitas gaya yang relatif tinggi. Hal ini disebabkan oleh kemampuan deformasi plastis yang lebih terbatas dengan faktor daktilitas hanya sebesar 2.10. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas gaya tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kemampuan disipasi energi apabila tidak diikuti oleh peningkatan kapasitas deformasi pasca-leleh.

Temuan ini konsisten dengan hasil distribusi tegangan dan kurva histeresis yang telah dibahas sebelumnya. Model-model *parabolic slit* menunjukkan penyebaran tegangan yang lebih merata pada area *web* serta kurva histeresis yang lebih stabil dibandingkan model *block slit*. Stabilitas respons tersebut memungkinkan akumulasi deformasi plastis yang lebih

besar sebelum terjadinya kegagalan, sehingga meningkatkan kemampuan disipasi energi struktur.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi REDF menunjukkan bahwa konfigurasi *parabolic slit* memberikan performa yang lebih baik dibandingkan konfigurasi *block slit* dalam meningkatkan kemampuan disipasi energi relatif pada sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF). Dari seluruh model yang diteliti, SL-P3 merupakan konfigurasi yang paling efektif karena mampu menghasilkan kombinasi terbaik antara kapasitas kekuatan, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi.

Kecenderungan peningkatan nilai REDF pada model *parabolic slit* menunjukkan bahwa kemampuan disipasi energi relatif sangat dipengaruhi oleh kombinasi kapasitas pasca-leleh dan kapasitas deformasi inelastis. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Hwang et al., 2024) dan (Mianji et al., 2024) yang melaporkan bahwa geometri *slit* yang mampu menghasilkan distribusi tegangan lebih merata cenderung memiliki respons histeresis yang lebih stabil dan kemampuan disipasi energi yang lebih tinggi. Pada penelitian ini, model SL-P3 menghasilkan nilai REDF tertinggi sebesar 3.20 yang menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut memberikan kombinasi terbaik antara kapasitas kekuatan, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi relatif.

4. KESIMPULAN

Konfigurasi *parabolic slit* secara umum menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan *block slit* pada sistem EBF kategori *link* pendek. Berdasarkan hasil distribusi tegangan, respons histeresis, kurva *backbone*, daktilitas, dan disipasi energi, model SL-P3 menghasilkan kinerja terbaik dengan kapasitas gaya maksimum tertinggi, daktilitas terbesar, serta kemampuan disipasi energi relatif paling tinggi. Geometri *parabolic slit* mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata, mengurangi konsentrasi tegangan lokal, serta mempertahankan stabilitas respons pasca-leleh dalam rentang deformasi yang lebih besar. Hasil ini menunjukkan bahwa modifikasi geometri *slit* berpengaruh signifikan terhadap performa seismik elemen *link* pada sistem EBF. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena seluruh evaluasi dilakukan melalui simulasi numerik tanpa validasi eksperimental. Selain itu, parameter yang dikaji hanya terbatas pada variasi geometri *slit* dan jarak antar *slit* pada satu kategori *link* pendek. Oleh karena itu, penelitian lanjutan direkomendasikan berupa pengujian laboratorium untuk memvalidasi hasil numerik, mengembangkan model analitik prediktif, serta mengevaluasi pengaruh variasi profil, mutu baja, dan konfigurasi panjang *link* lainnya terhadap kinerja sistem EBF.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Struktur Institut Tekologi Sepuluh Nopember Surabaya atas dukungan serta fasilitas software Abaqus yang berlisensi.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmadie Amiri, H., Najafabadi, E. P., & Estekanchi, H. E. (2018). Experimental and analytical study of Block Slit Damper. *Journal of Constructional Steel Research*, *141*, 167–178. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.11.006

Ahmadie Amiri, H., Pournamazian Najafabadi, E., Esmailpur Estekanchi, H., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Performance-based seismic design and assessment of low-rise steel special moment resisting frames with block slit dampers using endurance time method. *Engineering Structures*, *224*, 110955. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110955

ANSI/AISC 341-22. (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-22)*. American Institute of Steel Construction.

Askariani, S. S., & Garivani, S. (2020). Introducing and numerical study of a new brace-type slit damper. *Structures*, *27*, 702–717. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.019

Balik, F. S., Bahadir, F., & Emir, F. (2021). Behavior of steel cross members with metallic damper under a monotonic loading effect. *Structures*, *32*, 946–957. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.078

Bu, H., He, L., & Jiang, H. (2021). Seismic fragility assessment of steel frame structures equipped with steel slit shear walls. *Engineering Structures*, *249*, 113328. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113328

Chu, G., Wang, W., & Zhang, Y. (2020). Nonlinear seismic performance of beam-through steel frames with self-centering modular panel and replaceable hysteretic dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, *170*, 106091. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106091

Hasanoğlu, S., Güllü, E., & Güllü, A. (2023). Empirical correlations of constant ductility seismic input and hysteretic energies with conventional intensity measures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *21*(10), 4905–4922. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01722-x

Hwang, B., Kim, T., & Ahn, Y. (2024). Experimental and numerical investigation of austenitic stainless steel (304 type) slit damper structural behavior. *Thin-Walled Structures*, *196*, 111551. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111551

Kiani, B. K., Hosseini Hashemi, B., & Torabian, S. (2020). Optimization of slit dampers to improve energy dissipation capacity and low-cycle-fatigue performance. *Engineering Structures*, *214*, 110609. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110609

Lettieri, A., de la Peña, A., Freddi, F., & Latour, M. (2023). Damage-free self-centring links for eccentrically braced frames: development and numerical study. *Journal of Constructional Steel Research*, *201*, 107727. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107727

Li, T., Su, M., & Guo, J. (2022). A plastic design method based on multi-objective performance for high-strength steel composite K-shaped eccentrically braced frame. *Journal of Constructional Steel Research*, *198*, 107562. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107562

Mansouri, A. (2021). Development of a novel haunched link for eccentrically braced frames. *Engineering Structures*, *245*, 112870. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112870

Rafael, J. W. M., & Lukas, A. Y. (2020). Comparison Study Of Bracing Configuration With Shear Link In Eccentrically Braced Frame Steel Structure. *Journal Innovation of Civil Engineering (JICE)*, *1*(1), 7. https://doi.org/10.33474/jice.v1i1.9058

Mianji, A., Garivani, S., Askariani, S. S., & Aliakbari, F. (2024). Modeling parameters and numerical acceptance criteria for steel slit dampers. *Structures*, *69*, 107408. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107408

Mortazavi, S. J., Mansouri, I., Awoyera, P. O., & Hu, J. W. (2022). Comparison of thermal performance of steel moment and eccentrically braced frames. *Journal of Building Engineering*, *49*, 104052. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104052

Olia, S. S., & Saffari, H. (2024). A novel slit damper configuration to enhance ductility and seismic behavior of concentrically braced frames. *Structures*, *66*, 106823. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106823

Özkılıç, Y. O. (2022). Interaction of flange and web slenderness, overstrength factor and proposed stiffener arrangements for long links. *Journal of Constructional Steel Research*, *190*, 107150. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107150

Pangestuti, P. A., & Suswanto, B. (2021). Analisis Performa Eccentrically Braced Frames (EBF) Vertikal Link Menggunakan Wide Flange (WF) Link. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, *19*(3), 247. https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v19i3.9628

Rodríguez-Moreno, V., Guerrero, H., Escobar, J. A., & Terán-Gilmore, A. (2025). Experimental behavior of a precast beam-column connection equipped with a slit damper subjected to cyclic loading. *Structures*, *74*, 108655. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.10865

Rousta, A. M., Gorji Azandariani, M., Safaei Ardakani, M. A., & Shoja, S. (2022). Cyclic behavior of an energy dissipation system with the vertical steel panel flexural-yielding dampers. *Structures*, *45*, 629–644. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.047

Titirla, M. D. (2023). A State-of-the-Art Review of Passive Energy Dissipation Systems in Steel Braces. *Buildings*, *13*(4), 851. https://doi.org/10.3390/buildings13040851

Rafael, J. W. M., Suswanto, B., Chiu, C.-K., Iranata, D., R. Amalia, A., & Ghifari, F. (2026). Investigation of Slit Link Behavior with Wide-Flange (WF) Sections in Eccentrically Braced Frames (EBFs). *Civil Engineering Journal*, *12*(3), 972–985. https://doi.org/10.28991/CEJ-2026-012-03-08

Xu, Y.-L., Hao, J.-P., Su, Y.-X., & Shang, Y.-F. (2022). Seismic Performance of Column-Tree Moment Connections with Slit Dampers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *26*(6), 2789–2798. https://doi.org/10.1007/s12205-022-0834-6

Zhao, B., Lu, B., Zeng, X., & Gu, Q. (2021). Experimental and numerical study of hysteretic performance of new brace type damper. *Journal of Constructional Steel Research*, *183*, 106717. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106717

Zhao, X., & Qi, A. (2022). Developing and testing innovative beam–column joint damper. *Structures*, *41*, 1584–1601. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.113

Zhong, P., Liu, Y., Liu, X., & Zhang, C. (2025). Experimental and theoretical study on the seismic performance of an earthquake-resilient rocking column with a steel slit damper. *Thin-Walled Structures*, *216*, 113622. https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113622