

## Evaluasi Daktilitas Balok Kastella Akibat Variasi Geometri Dogbone Pada Sambungan RBS Dengan Pembebanan Siklik

Risman Firman<sup>1\*</sup>, Michail Amin<sup>2</sup>, Herman Parung<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie

<sup>2</sup>Universitas Sulawesi Barat

<sup>3</sup>Universitas Hasanuddin

\*Email: risman@ith.ac.id

### Abstract

*This study investigates the seismic performance of castellated steel beams incorporating a Reduced Beam Section (RBS) with a dogbone configuration under cyclic loading with the objective of enhancing the ductility of beam-column connections in steel moment resisting frames located in seismic prone regions. Four beam-column subassembly specimens with end-plate connections were experimentally tested, comprising two specimens with varying dogbone depth (RBSCa-1 and RBSCa-2) and two specimens with varying dogbone width (RBSCa-3 and RBSCa-4). The experimental program followed a displacement-controlled cyclic loading procedure in accordance with AISC 341 and FEMA 350, in which drift levels were defined based on a yield displacement of  $\Delta y = 20$  mm and applied until strength degradation and ultimate failure were observed. Key seismic performance parameters evaluated include load-displacement response, drift ratio, plastic rotation capacity, and ductility ratio ( $\mu$ ) which were derived from backbone curves. The test results indicate that variations in dogbone depth result in a more significant enhancement of ductility and plastic rotation capacity than variations in dogbone width, with ductility ratios of 3.97 and 4.01 for RBSCa-1 and RBSCa-2, respectively, compared to 3.13 and 3.16 for RBSCa-3 and RBSCa-4. These findings demonstrate that dogbone depth is the most influential geometric parameter governing plastic hinge formation and energy dissipation, thereby contributing to the optimization of RBS dogbone design for improving the seismic resilience of steel moment-resisting frame systems.*

*Keywords: Castellated beam, dogbone, reduced beam section, cyclic loading, ductility*

### Abstrak

Penelitian ini mengkaji kinerja seismik balok baja kastella dengan konfigurasi Reduced Beam Section (RBS) tipe dogbone di bawah pembebanan siklik, sebagai upaya meningkatkan daktilitas sambungan balok-kolom pada struktur rangka momen baja di wilayah rawan gempa. Empat spesimen sub-assembly balok-kolom dengan sambungan end-plate diuji secara eksperimental, terdiri atas dua variasi kedalaman dogbone (RBSCa-1 dan RBSCa-2) dan dua variasi lebar dogbone (RBSCa-3 dan RBSCa-4). Pengujian dilakukan menggunakan pedoman pembebanan siklik berbasis perpindahan yang mengacu pada AISC 341 dan FEMA 350 dengan kontrol drift yang ditentukan berdasarkan perpindahan leleh  $\Delta y = 20$  mm hingga terjadinya degradasi kapasitas dan keruntuhan. Parameter kinerja seismik yang dianalisis meliputi hubungan beban-perpindahan, drift ratio, kapasitas rotasi plastis, serta rasio daktilitas ( $\mu$ ) yang dievaluasi melalui kurva backbone. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi kedalaman dogbone memberikan peningkatan daktilitas dan kapasitas rotasi plastis yang lebih signifikan dibandingkan variasi lebar, dengan rasio daktilitas sebesar 3.97 dan 4.01 pada RBSCa-1 dan RBSCa-2, dibandingkan 3.13 dan 3.16 pada RBSCa-3 dan RBSCa-4. Temuan ini menegaskan bahwa kedalaman dogbone merupakan parameter geometris yang paling dominan dalam mengendalikan pembentukan sendi plastis dan meningkatkan disipasi energi, sehingga memberikan kontribusi ilmiah terhadap optimasi desain RBS tipe dogbone untuk meningkatkan ketahanan seismik sistem rangka momen baja.

Kata kunci: Balok kastella, dogbone, reduced beam section, pembebanan siklik, daktilitas

## 1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan fenomena alam yang tidak dapat diprediksi dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktur bangunan, termasuk kerusakan parah hingga hilangnya nyawa, terutama pada bangunan yang tidak dirancang untuk menahan beban dinamis akibat getaran seismik. Sambungan balok-kolom pada struktur baja memiliki keunggulan dibandingkan beton bertulang karena berat sendiri yang lebih ringan dan kekuatan yang relatif tinggi [1], [2]. Namun, peristiwa gempa Northridge tahun 1994 menunjukkan banyaknya kerusakan pada koneksi balok-kolom baja, khususnya retakan pada las flens bawah balok yang kemudian menjalar ke flens kolom, sebagaimana dilaporkan oleh Firman et al. [3], [4]. Temuan tersebut menegaskan pentingnya peningkatan daktilitas sambungan balok-kolom baja, sehingga mendorong pengembangan metode *Reduced Beam Section* (RBS) sebagai strategi desain untuk mengendalikan lokasi sendi plastis dan memperbaiki perilaku deformasi plastis struktur.

Pada metode RBS, flens balok di dekat kolom dipotong atau dimensinya dikurangi. Pengurangan ini bisa berupa bentuk *dogbone* atau radius, yang secara efektif mengurangi kekuatan balok di area tersebut.

Penelitian oleh Yang et al. 2024, menunjukkan bahwa hasil studi menunjukkan koneksi berbentuk sarang lebah (*honeycomb*) menunjukkan deformasi yang lebih baik dibandingkan dengan koneksi lubang web terbuka [5].

Kemudian Horton et al., 2021 juga melaporkan dengan permodelan elemen hingga (FE) yang terperinci dari berbagai sambungan RBS yang selanjutnya dilakukan analisis parametrik yang luas pada 90 spesimen berbeda untuk menilai bagaimana parameter geometris sambungan RBS, hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kedalaman dan lebar dari potongan RBS adalah parameter desain geometris yang paling berpengaruh hingga 30 % pada parameter kinerja utama dibanding tanpa RBS [6].

Yao et al., 2023 melakukan studi mengenai penggunaan *Hollow Core Partially Encased Composite Beams* (HPEC beam) pada RSCFB-1, yang terbukti efektif dalam memenuhi kapasitas seismik tanpa meningkatkan beban mati secara signifikan [7]. Hasil eksperimen ini dikonfirmasi dengan model elemen hingga, dan model-model ini dibuat untuk analisis parametrik.

Sementara itu Tartaglia et al., 2023 menemukan bahwa asumsi pemodelan elemen hingga yang diadopsi berhasil mensimulasikan respons mekanik sambungan berdasarkan perbandingan dengan beberapa hasil eksperimen yang tersedia dalam literatur seperti kekakuan elastis, ketahanan, dan pola kerusakan dapat diprediksi dengan akurat. Respons kerusakan yang terjadi pada balok yang telah diprediksi menunjukkan hasil yang akurat [8]. Dimana semua sambungan RBS menunjukkan bahwa perilaku balok sangat daktil dibawah pembebanan siklik dengan rotasi yang diterapkan 4% dan 6%.

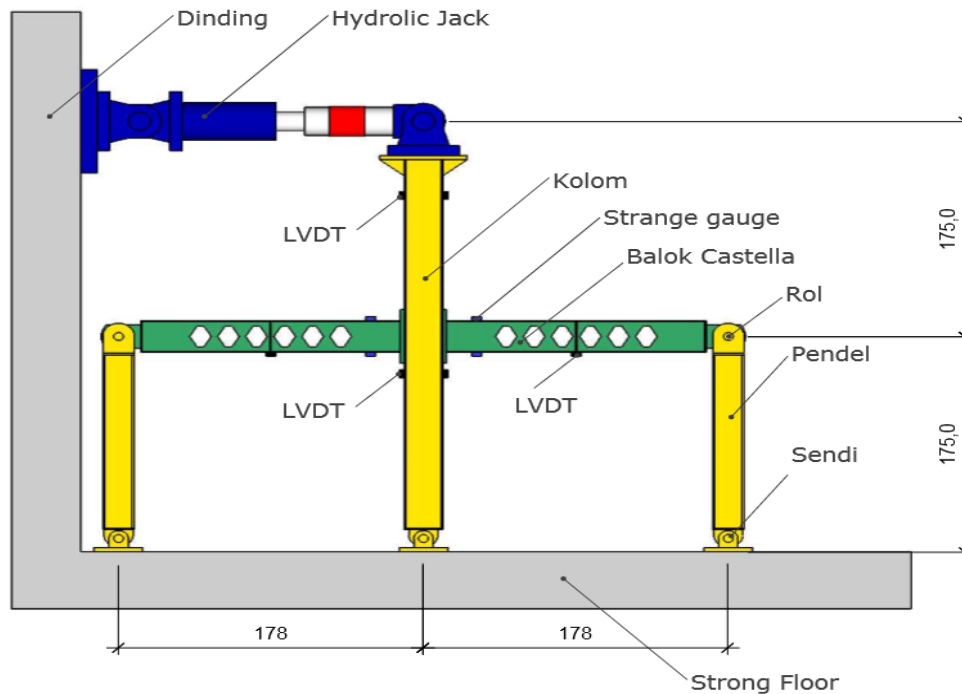
Merujuk pada literatur yang ada, metode *Reduced Beam Section* (RBS) terbukti efektif dalam meningkatkan daktilitas balok dan mereduksi respons gempa pada struktur rangka baja. Kebaruan penelitian ini terletak pada kajian eksperimental terhadap pengaruh variasi geometri RBS model *dogbone*, khususnya kedalaman dan panjang *dogbone* terhadap besaran daktilitas yang dihasilkan. Permodelan ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas rotasi daktilitas serta mengidentifikasi mekanisme deformasi plastis balok akibat perubahan konfigurasi geometris RBS model *dogbone*.

## 2. Metoda Penelitian

Model struktur yang digunakan merupakan struktur balok kolom interior-eksterior. Penelitian dilakukan dengan pengujian eksperimental dengan akibat beban lateral bolak balik (siklik) dengan menggunakan metode RBS pada balok kastella yang akan menghasilkan seberapa besar pengaruh daktilitas yang dihasilkan pada benda uji sesuai [9]. Pengujian siklik dilakukan berdasarkan

rujukan pembebanan berbasis perpindahan yang mengacu pada AISC 341 (*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*) dan FEMA 350, sedangkan ketentuan geometris dan konsep desain RBS mengacu pada AISC 358-16. Jenis sambungan yang digunakan

adalah sambungan end-plate yang direkomendasikan sebagai bagian dari sistem *Special Moment Resisting Frame* (SMRF) dan *Intermediate Moment Resisting Frame* (IMRF) pada bangunan baja tahan gempa.

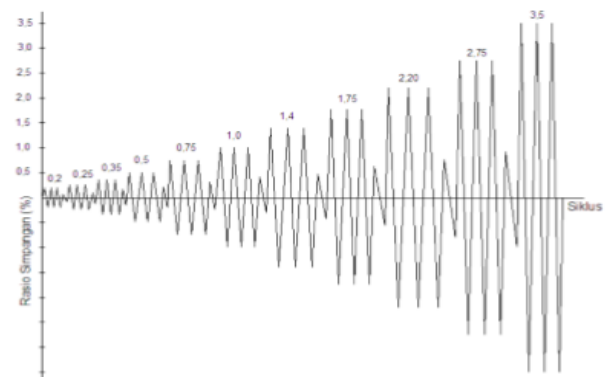


Gambar 1. Setup Pengujian Balok Kolom Kastella

Penelitian ini berfokus pada kapasitas struktural balok kastella yang direkayasa dengan metode RBS, khususnya model "Dogbones". Eksperimen dirancang menggunakan metode balok-kolom yang dikenai pembebanan siklik, dan selama pengujian, pengukuran dilakukan menggunakan perangkat LVDT, yang kemudian dicatat ke komputer dalam bentuk data.

Pembebanan dilakukan bolak-balik menggunakan dongkrak hidrolik dan sel beban secara progresif sesuai dengan nilai perpindahan ( $\Delta y$ ) dari hasil analisis pertama, yaitu 20 mm. Jumlah perpindahan (titik leleh) untuk setiap siklus ditentukan sebagai  $0,25\Delta y$ ,  $0,5\Delta y$ ,  $0,75\Delta y$ ,  $\Delta y$ ,  $2\Delta y$ ,  $3\Delta y$ , dan seterusnya,

dilanjutkan hingga beban menurun dari puncak sebelum terjadi keruntuhan. Beban lateral kemudian diterapkan dengan laju perpindahan awal sebesar 0,1 mm per detik.

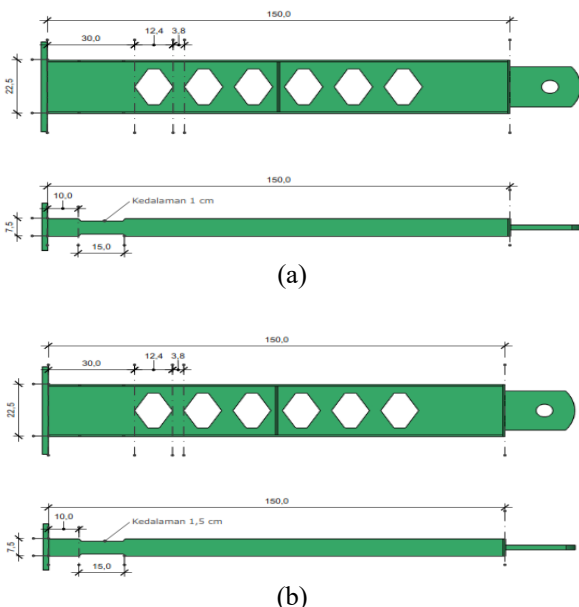


Gambar 2. Pola Pembebanan

### 2.1. Model Desain dengan Mengacu pada Kedalaman RBS

Tabel. 1 Permodelan RBS berdasarkan kedalaman

Sampel Balok	RBSCa-1	RBSCa-2
Jarak bukaan balok kastella dari tepi kolom (mm)	300	300
Jarak bukaan dari tepi kolom (mm)	100	100
Variasi kedalaman RBS (mm)	100	150

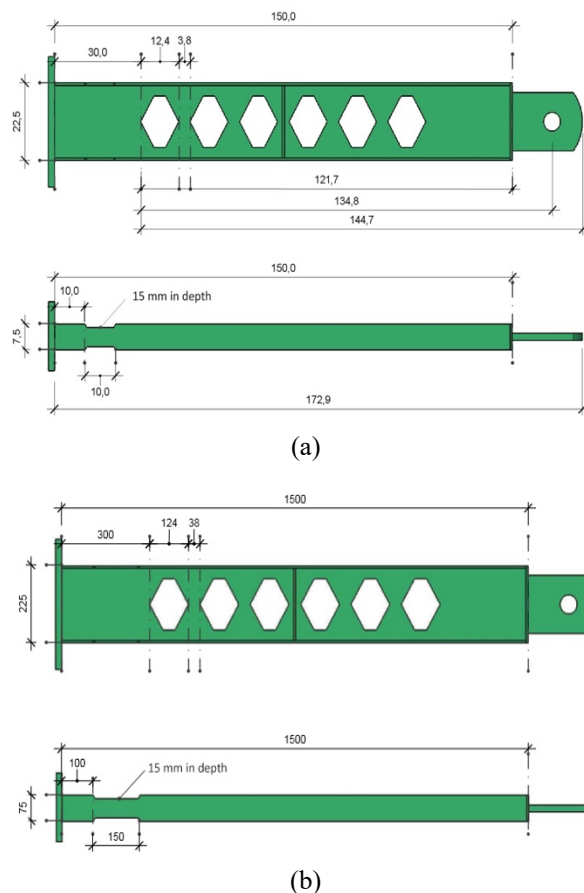


Gambar 3. Balok Kastella dengan permodelan RBS terhadap kedalaman Desain

### 2.2. Model Desain dengan Mengacu pada Lebar RBS

Tabel 2. Permodelan RBS berdasarkan lebar

Sampel Balok	RBSCa-3	RBSCa-4
Jarak bukaan balok kastella dari tepi kolom (mm)	300	300
Jarak bukaan dari tepi kolom (mm)	100	100
Variasi kedalaman RBS (mm)	100	150

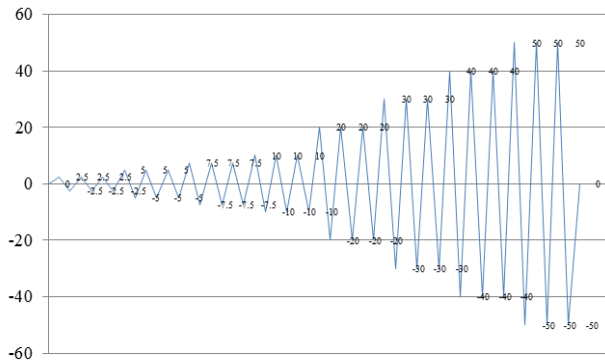


Gambar 4. Balok Kastella Dengan Permodelan RBS Terhadap Lebar Desain

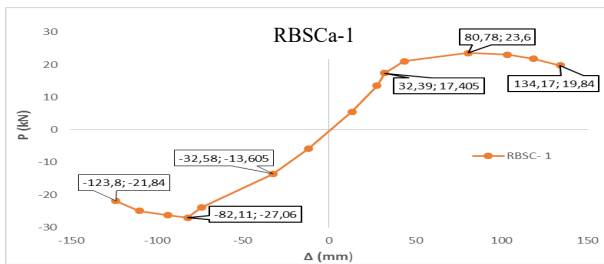


Gambar 5. Instrument Pengujian Balok Kastella dan RBS

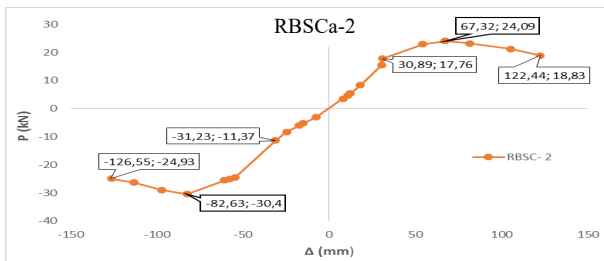
### 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan



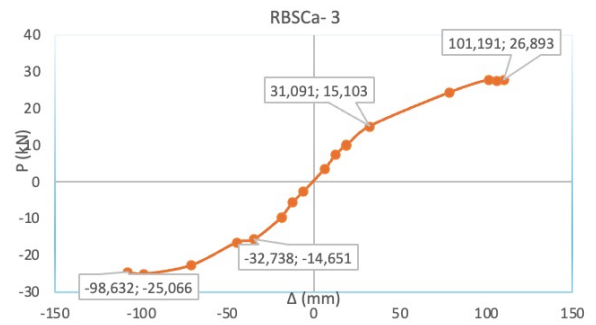
Gambar 6. Pola Beban Siklik Monotonik



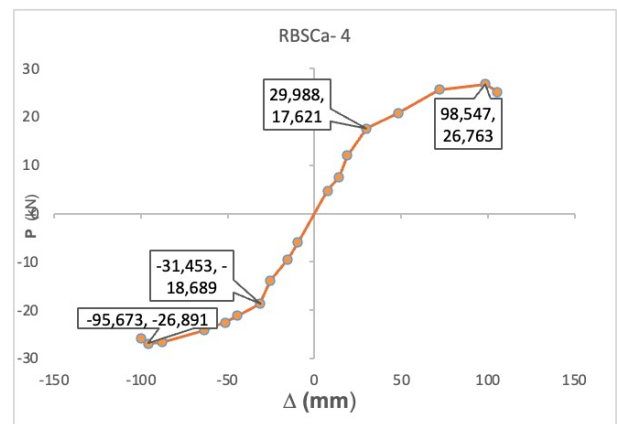
Gambar 7. Kurva back bone titik leleh pertama dan maksimum daerah tarik dan dorong pada RBSCa-1



Gambar 8. Kurva back bone titik leleh pertama dan maksimum daerah tarik dan dorong pada RBSCa-2



Gambar 9. Kurva back bone titik leleh pertama dan maksimum daerah tarik dan dorong pada RBSCa-3



Gambar 10. Kurva back bone titik leleh pertama dan maksimum daerah tarik dan dorong pada RBSCa-4

Tabel 3. Daktilitas semua jenis sampel

Test Beam Type	Loadv(P)				Displacement (Δ)				μ		μ average
	Py (kN)		Pu (kN)		Δy (mm)		Δu (mm)		+	-	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
Castella RBSCa-1	17.4	13.6	19.84	21.84	32.39	32.58	134.17	123.8	4.14	3.80	<b>3.97</b>
Castella RBSCa-2	17.76	11.37	18.83	24.93	30.89	31.23	122.44	126.5	3.96	4.05	<b>4.01</b>

Castella											
RBSCa-3	15.10	14.65	26.89	25.07	31.09	32.74	101.19	98.63	3.25	3.01	<b>3.13</b>
RBSCa-4	17.62	18.69	26.76	26.89	29.99	31.45	98.55	95.67	3.29	3.04	<b>3.16</b>

Dalam tabel di atas, dapat dilihat bahwa nilai rasio daktilitas dari desain *Reduced Beam Section* (RBS) yang fokus pada kedalaman desain diperoleh nilai rasio daktilitas 3.97 untuk RBSCa-1 dan 4.01 untuk RBSCa 2, lebih tinggi dibandingkan dengan desain yang fokus pada lebar RBS, dengan nilai 3.13 untuk RBSCa 3 dan 3.16 untuk RBSCa 4.

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman *dogbone* pada metode *Reduced Beam Section* (RBS) memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap peningkatan daktilitas dibandingkan lebar *dogbone*. Spesimen RBSCa-1 dan RBSCa-2 yang memiliki variasi kedalaman menghasilkan rasio daktilitas tertinggi, yaitu 3.97-4.01, sedangkan spesimen RBSCa-3 dan RBSCa-4 dengan variasi lebar hanya mencapai 3.13-3.16. Hal ini menegaskan bahwa semakin dalam pemotongan *dogbone*, semakin efektif pembentukan sendi plastis yang terjadi pada balok, sehingga perpindahan maksimum dan kapasitas deformasinya ikut meningkat.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Aswad et al. (2020) yang menyatakan bahwa peningkatan kedalaman RBS membuat zona plastis lebih mudah terbentuk sehingga deformasi inelastis dapat berkembang lebih optimal [10], [11]. Selain itu, hasil penelitian ini juga mendukung temuan Horton et al. (2021) yang menyatakan bahwa parameter geometrik paling berpengaruh dalam kinerja RBS adalah kedalaman dan lebar, namun kedalaman berkontribusi lebih besar hingga 30% terhadap peningkatan perilaku daktil sambungan [6].

Penelitian Firman et al. (2019, 2020) juga menunjukkan bahwa *dogbone* dengan kedalaman lebih besar menghasilkan rotasi plastis yang lebih baik yang konsisten dengan pola deformasi pada RBSCa-1 dan RBSCa-2 dalam studi ini [3], [4]. Hal yang sama

ditunjukkan oleh Tartaglia et al. (2023), di mana sambungan RBS memperlihatkan perilaku sangat daktil di bawah beban siklik, serupa dengan pola kurva *backbone* pada penelitian ini yang menunjukkan respons tarikan yang simetris dan stabil [8].

Sementara itu, spesimen dengan variasi lebar *dogbone* memiliki kapasitas perpindahan yang lebih kecil. Pola ini memperkuat kesimpulan bahwa pelebaran *dogbone* cenderung meningkatkan kekakuan awal tetapi mengurangi ruang plastis yang dapat berkembang. Respons ini konsisten dengan kajian Frans et al. (2019) dan Yao et al. (2023) yang melaporkan bahwa perubahan geometri yang memperbesar area efektif flens justru membatasi deformasi plastis pada sambungan [7], [12].

Secara umum, hasil penelitian ini memperkuat bukti empiris dan numerik dalam literatur bahwa desain RBS yang mengoptimalkan kedalaman *dogbone* jauh lebih efektif dalam meningkatkan daktilitas, disipasi energi, dan ketahanan sambungan balok-kolom terhadap beban siklik. Dengan demikian, penggunaan variasi kedalaman *dogbone* lebih direkomendasikan untuk desain struktur baja tahan gempa.

#### 4. Kesimpulan

Hasil pengujian siklik menunjukkan bahwa variasi kedalaman *dogbone* pada metode RBS memberikan kinerja struktural yang lebih baik dibandingkan variasi lebar *dogbone*. Spesimen RBSCa-1 dan RBSCa-2 menghasilkan rasio daktilitas tertinggi, yaitu 3.97 dan 4.01, serta perpindahan maksimum 122-134 mm, menandakan kemampuan deformasi plastis yang lebih besar. Sebaliknya, spesimen dengan variasi lebar RBS (RBSCa-3 dan RBSCa-4) menunjukkan daktilitas lebih rendah, yaitu 3.13

dan 3.16, dengan perpindahan maksimum hanya 95-101 mm, sehingga deformasi plastisnya lebih terbatas. Respons tarik dan tekan pada semua spesimen relatif simetris, menunjukkan kestabilan perilaku di bawah beban bolak-balik. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa kedalaman *dogbone* lebih berpengaruh dalam meningkatkan daktilitas dan kapasitas deformasi balok kastella, sehingga lebih direkomendasikan untuk desain struktur tahan gempa.

## 5. Saran

Diperlukan pengujian kombinasi antara kedalaman dan lebar *dogbone* untuk menemukan konfigurasi RBS yang paling optimal dalam meningkatkan daktilitas. Pemodelan elemen hingga juga disarankan untuk memvalidasi hasil eksperimen serta memungkinkan eksplorasi parameter yang lebih luas. Selain itu, bentuk RBS lain seperti radius cut, tapered cut, atau double RBS dapat dikaji sebagai pembandingan perilaku struktural.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] L. Simões da Silva *et al.*, “Experimental behaviour of large-size beam-to-column steel joints for the DUNE Neutrino Experiment,” *Thin-Walled Structures*, vol. 191, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110996.
- [2] S. Nie *et al.*, “Seismic behavior of welded high-performance steel beam-to-column joints with different reinforced configurations,” *J Constr Steel Res*, vol. 210, p. 108113, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.JCSR.2023.108113.
- [3] R. Firman, H. Parung, and A. A. Amiruddin, “The Dogbone Depth Effect of Castellated Beam on Ductility Behavior,” *International Journal of Engineering and Science Applications*, 2019.
- [4] R. Firman, M. Amin, H. Parung, R. Irmawaty, and A. A. Amiruddin, “The effect of dogbones on the behaviour of a castellated steel beam under cyclic loads,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/419/1/012065.
- [5] K.-J. ; Yang *et al.*, “Citation: Study of Panel Zone Behavior in Interior Beam-Column Joints with Reduced Beam Section (RBS),” 2024, doi: 10.3390/buildings.
- [6] T. A. Horton, I. Hajirasouliha, B. Davison, and Z. Ozdemir, “More efficient design of reduced beam sections (RBS) for maximum seismic performance,” *J Constr Steel Res*, vol. 183, p. 106728, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JCSR.2021.106728.
- [7] Y. Yao, L. Zhou, H. Huang, Z. Chen, and Y. Ye, “Cyclic performance of novel composite beam-to-column connections with reduced beam section fuse elements,” *Structures*, vol. 50, pp. 842–858, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2023.02.054.
- [8] R. Tartaglia, M. D’Aniello, and R. Landolfo, “Response of Seismically Damaged Steel Reduced Beam Section Joints under Fire,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/app13063641.
- [9] Aisc, “Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplements No. 1 and No. 2,” 2016.
- [10] N. H. Aswad, H. Parung, R. Irmawaty, A. A. Amiruddin, and Fakhruddin, “Structural ductility of RBS on castellated beam subjected to cyclic loading,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/419/1/012151.
- [11] N. H. Aswad, Tachrir, H. Parung, and A. A. Amiruddin, “Shear Strength Analysis of Reduced Beam Section (RBS) on Castellated Beam,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/797/1/012024.
- [12] R. Frans, H. Parung, A. B. Muhiddin, and R. Irmawaty, “IJEScA Behaviour of Optimized Honey Comb Beam Under Monotonic Loading,” 2019.