

KINERJA BRESING SRBK DENGAN VARIABEL PANJANG BATANG YANG BERBEDA TERHADAP BEBAN SIKLIK

Arief Panjaitan^{1*}, Purwandy Hasibuan¹, Rudiansyah Putra¹, Mochammad Afifuddin¹,
Muhammad Haiqal²

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

²⁾ Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111,

*)email: arief_panjaitan@usk.ac.id

Diterima : 21 Maret 2023
Direvisi : 15 April 2023

Disetujui : 16 April 2023
Diterbitkan : 31 Mei 2023

Abstract: *Concentrically Braced Frames (CBF) is one of the seismic-resistant structures. In CBF, bracing is a diagonal component. As the energy dissipator, bracing will also experience failure due to the earthquake to prevent heavy damage to other CBF members, i.e., beams and columns. As far, several studies have been conducted to increase the performance of CBF bracing, i.e., by adding the sectional area of bracing. However, studies on the performance of double-section bracing particularly when it is connected with different plate configurations are still limited. This study investigated the seismic performance of a double-section bracing joined with the batten plate (BP) and lacing (L). Those bracings have different lengths, i.e., 600, 1200, and 1800 mm. The experimental work was carried out by employing cyclic loading history with yield displacement-controlled conditions. The result demonstrated that BL dissipates energy better than BP shown by the larger hysteretic curve. Contrarily, there was a negligible difference in strength and stiffness between BP and L which means the connecting plates have a slight effect to enhance strength and stiffness in bracing. Observation on the bracing lengths disclosed the BP and L are more effective to be implemented in shorter bracing presented by better energy dissipation.*

Keywords : *Concentrically Braced Frame, double bracings, batten plate, lacing, strength, stiffness, energy dissipation*

Abstrak: Sistem Rangka Bresing Konsentrik (SRBK) adalah salah satu sistem struktur tahan gempa. Pada SRBK, bresing adalah komponen diagonal. Sebagai disipator energi, bresing akan mengalami gagal untuk mencegah kerusakan berat pada komponen SRBK yang lain seperti balok dan kolom. Sejauh ini, beberapa studi telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja bresing SRBK, seperti menambah luas penampang bresing. Namun, kajian terkait kinerja bresing ganda khususnya ketika bresing ganda dihubungkan dengan konfigurasi pelat penghubung yang berbeda masih terbatas. Studi ini mengkaji kinerja seismik bresing ganda yang dihubungkan dengan pelat kopel (BP) dan lacing (L). Bresing memiliki panjang yang berbeda yaitu 600, 1200, dan 1800 mm. Kajian eksperimental dilakukan dengan menerapkan beban siklik dengan kontrol perpindahan leleh. Hasil menunjukkan bahwa BL menyerap energi yang lebih baik dari BP yang ditunjukkan melalui kurva histeresis yang lebih besar. Sebaliknya, terdapat perbedaan yang dapat diabaikan dalam kekuatan dan kekakuan antara BP dan L yang berarti pelat penghubung memiliki dampak yang tidak signifikan untuk menambah kekuatan dan kekakuan bresing. Observasi pada panjang bresing menunjukkan BP dan L lebih efektif untuk diterapkan pada bresing pendek yang ditunjukkan melalui disipasi energi yang lebih baik.

Kata kunci : Sistem Rangka Bresing Konsentrik, bresing ganda, pelat kopel, lacing, kekuatan, kekakuan, disipasi energi

1. PENDAHULUAN

Struktur bangunan tahan gempa dibutuhkan untuk dibangun pada wilayah rawan gempa seperti Provinsi Aceh. Sistem Rangka Bresing Konsentrik (SRBK) adalah tipe struktur tahan gempa yang memanfaatkan bresing untuk mereduksi deformasi lateral bangunan agar kerusakan berat tidak terjadi pada bangunan. Beberapa kajian telah dilakukan dalam ruang lingkup SRBK. Studi terdahulu memberikan rekomendasi terbaru terkait pemodelan fraktur pada bresing HSS dengan memvariasikan kelangsingan local dan pemanfaatan mortar beton yang mengisi HSS [1]. Kajian eksperimental juga dilakukan terhadap SRBK yang memiliki *initial bracing* (tanpa penggantian) dan SRBK dengan bresing baru untuk menggantikan bresing lama [2]. Peneliti yang lain melakukan analisis dinamis nonlinear terhadap struktur SRBK dengan 3 dan 6 lantai, dimana SRBK telah memiliki *Energy Dissipative Column* (EDC) [3]. Studi juga dilakukan dengan penggunaan *Shape Memory Alloys* (SMA) yang memiliki karakteristik super elastis dan

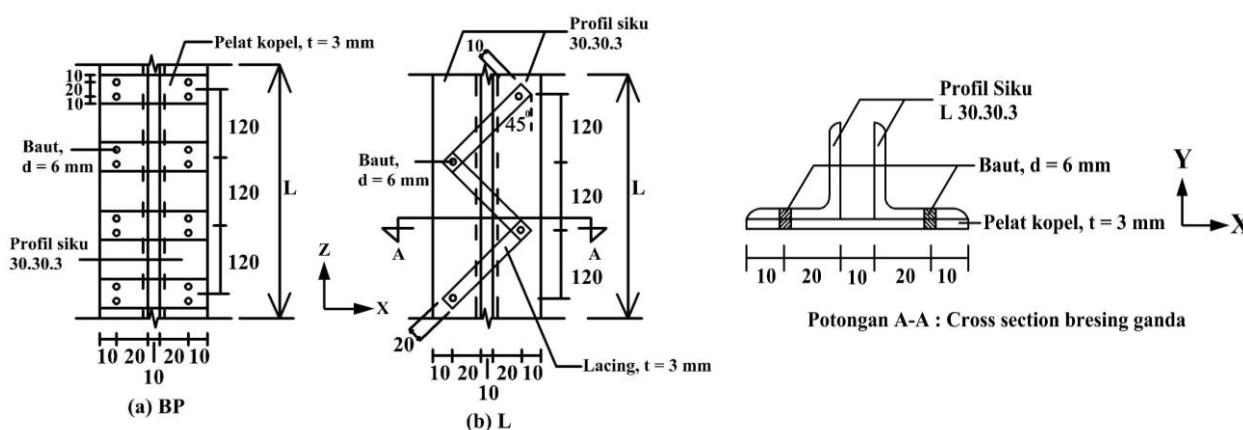
damping yang tinggi sebagai bresing untuk meningkatkan kinerja SRBK [4]

Investigasi kinerja *Seismik Self-Centering Concentrically Braced Frame* (SC-CBF) dan analisis beban berulang dalam lingkup *low-cycle fatigue* juga dikaji [5]. Kombinasi dua sistem yaitu *Self-Centering Braces* (SCBs) dan *Buckling-Restrained Braces* (BRBs) menunjukkan bresing dapat mengambil keunggulan kedua sistem [6]. Beberapa peneliti mengajukan sebuah sistem SRBK yang diperoleh dengan menggandakan penampang dari profil portal dan menggunakan sambungan *semi rigid* [7]. Kajian numerik dengan pendekatan analisis statis nonlinear pada bangunan 8 lantai juga dilakukan dan didesain terhadap intensitas seismik yang berbeda [8].

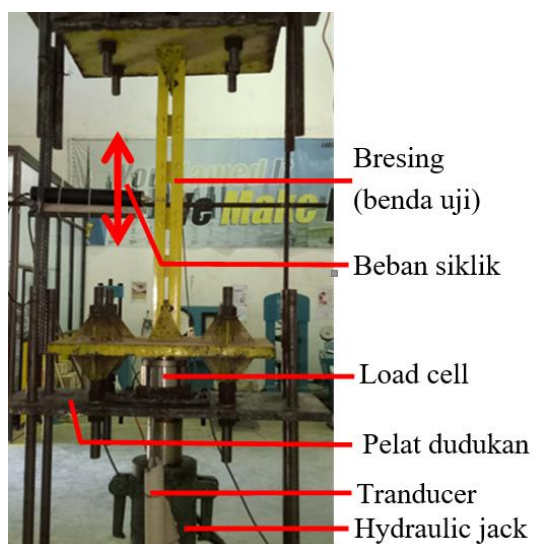
Peneliti yang lain melakukan kajian *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) terhadap model SRBK dengan beberapa ground motion [9]. Serangkaian analisis elemen hingga juga dilakukan untuk menginvestigasi distribusi tegangan pada pelat buhul SRBK [10].

Tabel 1. Karakteristik benda uji

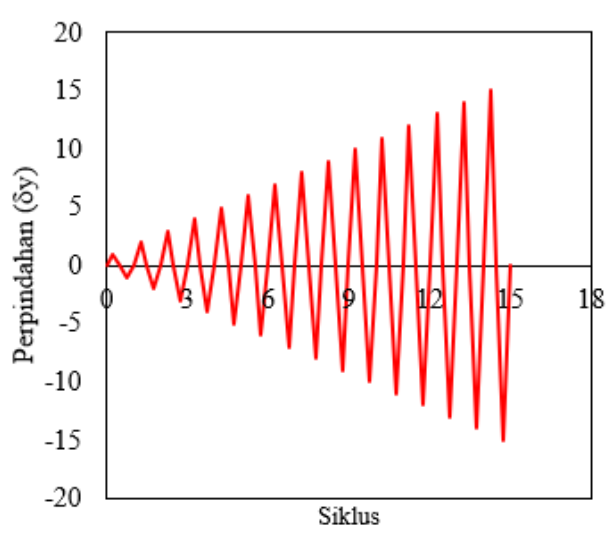
No	Benda uji	Penghubung	Panjang Bresing, L (mm)	No	Benda uji	Penghubung	Panjang Bresing, L (mm)
1	BP1	Pelat Kopel	600	4	L1	Lacing	600
2	BP2	Pelat Kopel	1200	5	L2	Lacing	1200
3	BP3	Pelat Kopel	1800	6	L3	Lacing	1800



Gambar 1. Benda uji (unit: mm)



Gambar 2. Set up pengujian



Gambar 3. Riwayat pembebanan siklik

Evaluasi dilakukan terhadap beberapa tipe SRBK yaitu tipe SRBK (*X*, *V*, *inverted V*, and *two-story X*) dan 4 tipe BRBF (*diagonal V*, *inverted V*, and *two-story X*). Studi menunjukkan kinerja terbaik ada pada *V*, *inverted V*, dan *two-story X BRBF* [11]. Kajian dilakukan terhadap delapan tipe SRBK dan menunjukkan konfigurasi bresing yang berbeda menentukan dimensi komponen SRBK [12]. Beberapa peneliti memperkenalkan rangka bresing inovatif yang dinamakan *Hexa-Braced Frame* untuk perbaikan respon seismik dari SRBK konvensional [13]. Peneliti yang lain menganalisis tipe SRBK dan mengacu kepada SNI 1729:2020, and AISC 341-16 [14]. Studi investigasi secara eksperimental dan analisis dilakukan untuk memberikan gambaran distribusi tegangan di sambungan pelat buhul sehubungan beban siklik [15]. Analisis perilaku bresing dari profil siku ganda dengan pendekatan *Finite Element* (FE) juga dilakukan pada studi terdahulu [16].

Walaupun beberapa studi telah dilakukan, studi kinerja terkait pemanfaatan penghubung yang berbeda pada batang ganda masih perlu diklarifikasi. Hal ini mengingat penelitian terdahulu [16] hanya mengkaji perilaku bresing ganda, tanpa bahasan pelat penghubung. Penelitian ini mengkaji pengaruh pehubung, yaitu pelat kopel dan lacing pada bresing yang berbeda panjang. Dari kajian disarankan konfigurasi penghubung yang memiliki kekuatan, kekakuan, dan disipasi energi yang paling baik dengan mempertimbangkan masing-masing panjang bresing.

2. METODE PENELITIAN

Konfigurasi benda uji diperlihatkan pada **Tabel 1**, dimana benda uji divariasikan dalam pelat penghubung penampang bresing tersusun dan panjang bresing. Pelat

penghubung yang digunakan adalah pelat kopel (BP) dengan susunan horizontal dan lacing (L) dengan susunan diagonal. Terdapat 6 (enam) benda uji seperti disajikan pada **Tabel 1**. Pada studi yang terbaru ini, panjang segmen tekan direncanakan sama untuk semua benda uji yaitu 120 mm, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 1**.

Bresing memiliki tegangan leleh 240 MPa dan tegangan ultimit sebesar 324 MPa. **Gambar 2** mengilustrasikan *set up* pengujian. Pengujian diawali dengan pemasangan benda uji pada *loading frame*. Beban siklik diberikan melalui *hydraulic jack* yang terdapat pada sisi bawah perletakan benda uji, menurut prinsip kontrol perpindahan (*displacement controlled*). Riwayat pembebanan diilustrasikan pada **Gambar 3**. Pada setiap siklus, dilakukan perekaman data beban dan perpindahan. Perekaman data beban diukur berdasarkan bacaan *load cell* dan nilai perpindahan diperoleh dari pengukuran *transducer*. Pengujian dilakukan hingga 15 siklus, karena 15 siklus dianggap cukup untuk memberikan gambaran kinerja benda uji. Pendekatan analisis menunjukkan pengujian yang melebihi 15 siklus ($15 \delta_y$) akan mengakibatkan kegagalan tarik pada daerah yang tidak diharapkan, yaitu pada sambungan las antara pelat dudukan dengan ujung *hydraulic jack*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

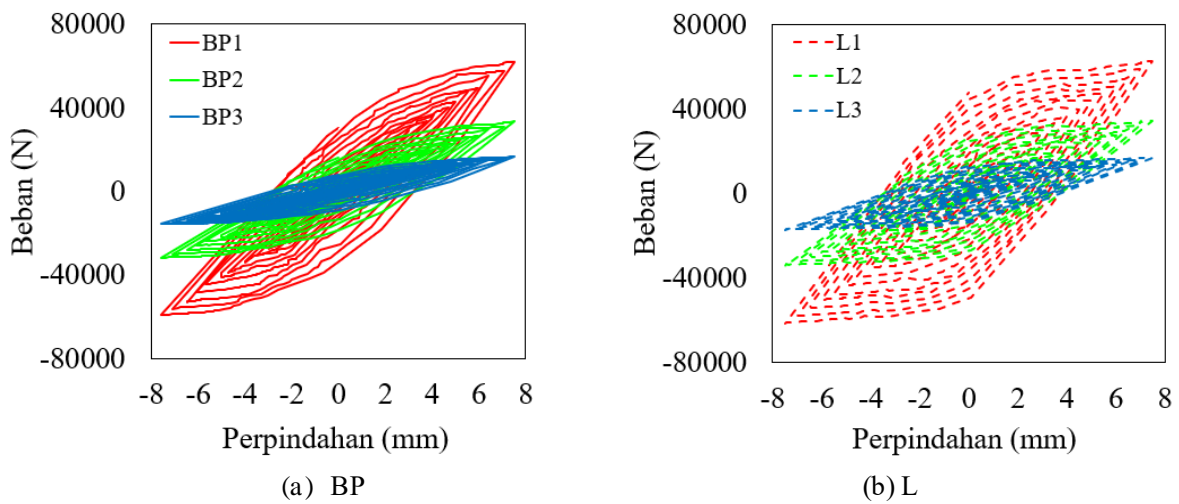
Kurva histerisis beban-perpindahan diperlihatkan pada **Gambar 4**. Pada gambar terlihat bahwa bresing yang lebih pendek menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan bresing yang lebih panjang. Hal ini ditunjukkan melalui kurva histerisis yang lebih besar dan stabil pada kedua tipe penghubung BP dan L.

Selain itu, pengamatan pada tipe penghubung menunjukkan bahwa L memiliki kurva histerisis yang lebih besar daripada BL untuk masing-masing panjang bresing. Hal ini menunjukkan bahwa kekangan yang dimiliki oleh penghubung lacing memiliki kontribusi dalam meningkatkan kinerja benda uji.

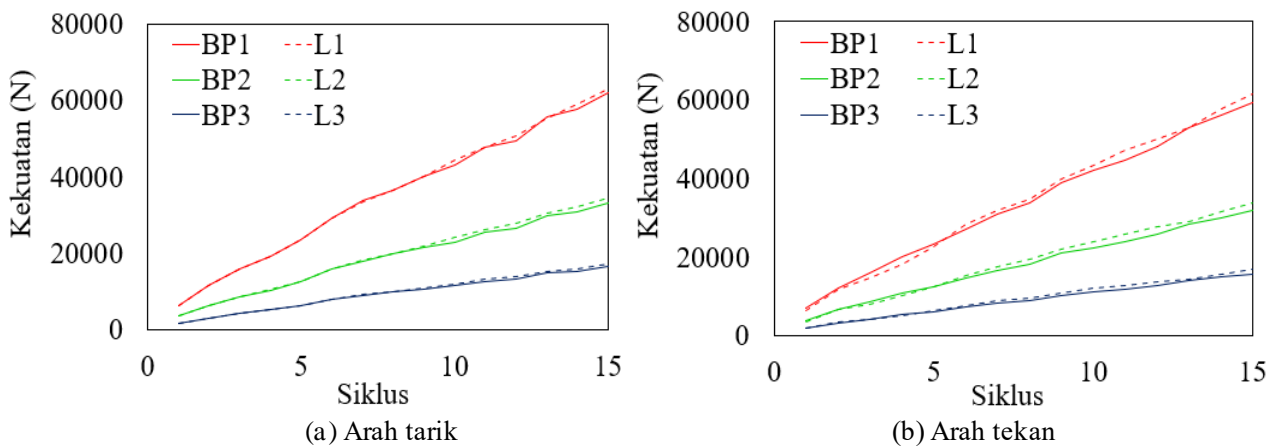
Gambar 5 mendeskripsikan kekuatan benda uji untuk arah tarik dan tekan. Dari gambar terlihat bahwa secara garis besar, L memiliki kekuatan yang sama dengan BP untuk masing-masing panjang bresing. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan

susunan pelat penghubung pada penampang ganda memiliki pengaruh yang dapat diabaikan untuk meningkatkan kekuatan.

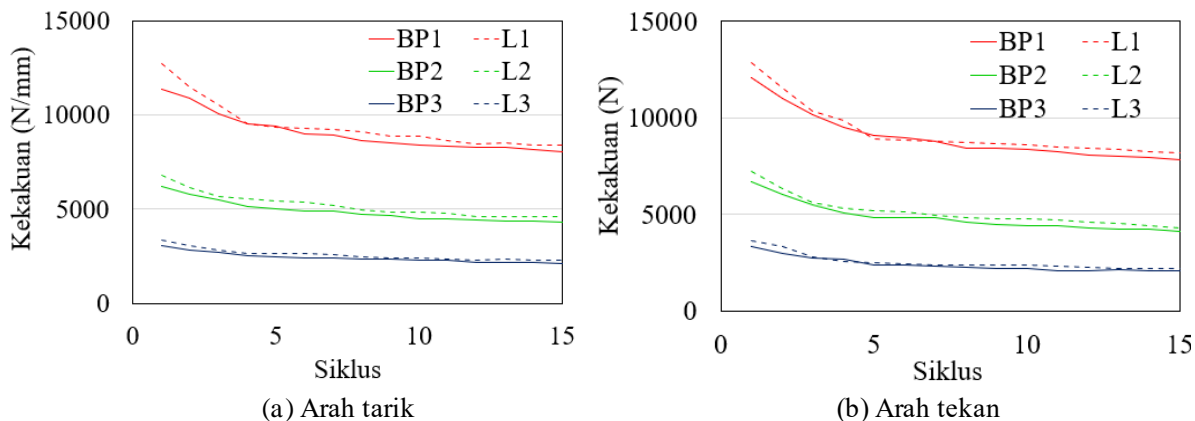
Pengamatan pada perbedaan panjang menginformasikan bahwa pengurangan panjang batang dapat meningkatkan kekuatan bresing untuk kedua tipe pelat penghubung, BP dan L. Pada siklus ke-15, BP1 memiliki kekuatan tarik ($P_{u\text{ tarik}} = 61977$ N) dan kekuatan tekan ($P_{u\text{ tekan}} = 59338$ N). Jika nilai kekuatan ini dibandingkan dengan masing-masing BP2 dan BP3, BP1 memiliki kekuatan yang lebih besar sekitar 86,2 % dan 276,5 %.



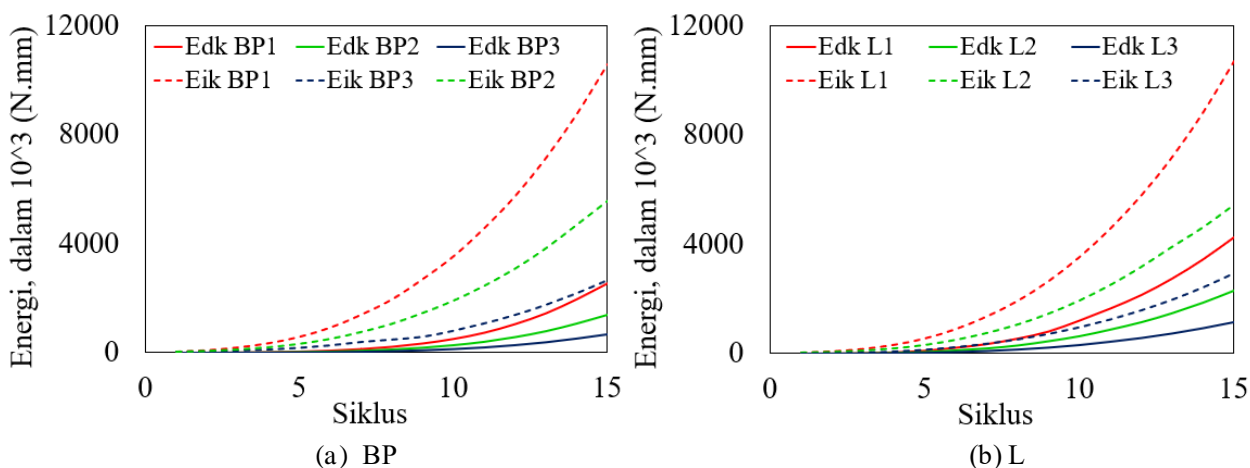
Gambar 4. Kurva histerisis hubungan beban-perpindahan



Gambar 5. Kekuatan



Gambar 6. Kekakuan



Gambar 7. Energi kumulatif

Gambar 6 memberikan informasi penurunan nilai kekakuan bresing ganda seiring dengan berjalannya siklus pembebanan. Hal ini dimungkinkan sehubungan dengan penyebaran kelelahan yang telah terjadi pada komponen bresing dimana nilai kekuatan naik tidak signifikan seiring dengan peningkatan kontrol perpindahan yang diberikan. Pengamatan kekakuan dilakukan dalam arah tarik dan tekan. Gambar menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara kekakuan benda uji BP dan L.

Observasi pada perbedaan panjang batang memberikan gambaran bahwa bresing yang panjangnya lebih pendek, BP1 dan L1, cenderung menunjukkan degradasi kekakuan yang lebih cepat dibandingkan dengan bresing yang lebih panjang, L.

Selain itu, bresing yang lebih pendek terindikasi memiliki kekakuan yang lebih baik baik dibandingkan dengan bresing yang lebih panjang

untuk kedua tipe penyambung, BP dan L.

Gambar 6 menunjukkan bahwa pada siklus pertama BP1 memiliki kekakuan elastis dalam arah tarik ($K_{tarik} = 11376 \text{ N/mm}$) dan arah tekan ($K_{tekan} = 12094.2 \text{ N/mm}$). Jika nilai kekakuan ini dibandingkan dengan BP2 dan BP3, BP1 memiliki nilai kekakuan yang lebih besar sekitar 82,5 % dan 269 %.

Pengamatan pada nilai energi input kumulatif (E_{ik}) menunjukkan bahwa untuk semua siklus pembebanan BP1 lebih besar dibandingkan dengan BP2 dan BP3. L1 juga terindikasi lebih besar dibandingkan dengan L2 dan L3. Hal ini dapat diidentifikasi pada **Gambar 7**, **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Observasi pada tipe pelat penghubung menunjukkan bahwa BP memiliki disipasi energi yang lebih kecil dibandingkan dengan L untuk semua panjang bresing. Pengamatan pada siklus ke-15 menginformasikan L1 menunjukkan nilai $E_{dk} = 4.225 \times 10^6 \text{ N.mm}$. Jika dibandingkan dengan BP1,

L1 menunjukkan disipasi energi lebih besar sekitar 66,1 %.

Tabel 2 dan Tabel 3 juga menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang konkrit untuk nilai E_{ik} sehubungan perbedaan pelat penghubung

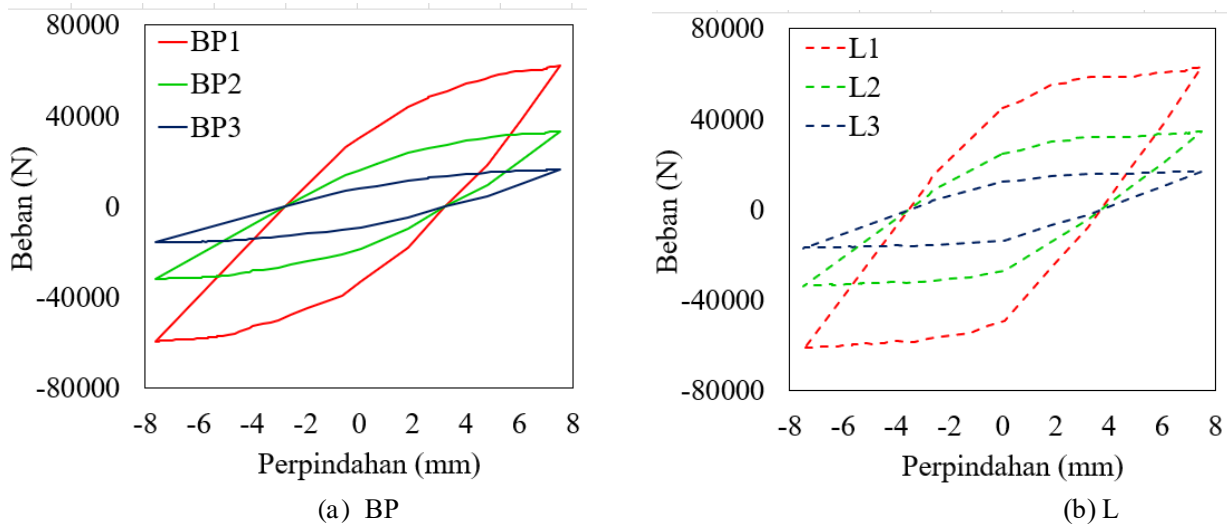
BP dan L, untuk panjang bresing yang sama. Sementara itu, E_{dk} menunjukkan perbedaan yang signifikan sehubungan dengan adanya perbedaan penghubung.

Tabel 2. Energi kumulatif untuk BP

Siklus ke-	δy (mm)	BP1			BP2			BP3		
		E_{dk} (10^3 N.mm)	E_{ik} (10^3 N.mm)	Ratio of E_{dk}/E_{ik} (%)	E_{dk} (10^3 N.mm)	E_{ik} (10^3 N.mm)	Ratio of E_{dk}/E_{ik} (%)	E_{dk} (10^3 N.mm)	E_{ik} (10^3 N.mm)	Ratio of E_{dk}/E_{ik} (%)
1	0.5	0.75	15.12	4.94	0.38	8.28	4.59	0.19	4.09	4.59
2	1	2.46	69.41	3.55	1.28	37.36	3.44	0.63	18.48	3.44
3	1.5	8.05	170.41	4.72	4.33	89.59	4.83	2.14	44.31	4.83
4	2	20.06	326.56	6.14	10.80	173.25	6.23	5.34	85.68	6.23
5	2.5	42.21	561.87	7.51	22.74	298.93	7.61	11.24	147.83	7.61
6	3	78.60	901.57	8.72	42.13	481.57	8.75	20.83	238.18	8.75
7	3.5	135.42	1372.64	9.87	72.51	734.24	9.88	35.86	363.14	9.87
8	4	218.71	1937.52	11.29	117.51	1037.20	11.33	59.03	450.96	13.09
9	4.5	340.67	2683.37	12.70	183.03	1436.06	12.74	91.43	554.90	16.48
10	5	507.11	3521.84	14.40	272.72	1887.16	14.45	135.79	776.96	17.48
11	5.5	734.53	4555.60	16.12	394.77	2435.65	16.21	196.14	1048.21	18.71
12	6	1051.04	5732.43	18.34	564.20	3067.57	18.39	279.93	1360.71	20.57
13	6.5	1446.12	7131.86	20.28	775.84	3816.82	20.33	384.59	1731.24	22.21
14	7	1960.70	8742.87	22.43	1051.50	4678.29	22.48	520.92	2157.27	24.15
15	7.5	2544.36	10575.94	24.06	1365.65	5555.45	24.58	676.21	2640.49	25.61

Tabel 3. Energi kumulatif untuk L

Siklus ke-	δy (mm)	L1			L2			L3		
		E_{dk} (10^3 N.mm)	E_{ik} (10^3 N.mm)	Ratio of E_{dk}/E_{ik} (%)	E_{dk} (10^3 N.mm)	E_{ik} (10^3 N.mm)	Ratio of E_{dk}/E_{ik} (%)	E_{dk} (10^3 N.mm)	E_{ik} (10^3 N.mm)	Ratio of E_{dk}/E_{ik} (%)
1	0.5	0.08	12.87	0.64	0.43	6.83	6.28	0.19	3.43	5.62
2	1	4.38	59.52	7.35	2.74	32.42	8.45	1.34	16.16	8.30
3	1.5	16.04	147.69	10.86	9.32	80.07	11.64	4.61	39.87	11.58
4	2	45.29	297.15	15.24	25.38	162.38	15.63	12.61	80.82	15.60
5	2.5	106.80	529.80	20.16	59.07	289.57	20.40	29.37	144.11	20.38
6	3	215.48	874.55	24.64	118.86	477.20	24.91	59.12	237.46	24.90
7	3.5	347.58	1335.45	26.03	191.44	728.27	26.29	95.23	362.84	26.25
8	4	545.53	1906.13	28.62	298.44	1041.30	28.66	148.47	518.59	28.63
9	4.5	804.64	2629.81	30.60	453.61	1438.99	31.52	219.01	716.46	30.57
10	5	1201.34	3511.57	34.21	634.99	1922.65	33.03	310.89	957.10	32.48
11	5.5	1640.30	4556.76	36.00	875.91	2495.95	35.09	430.76	1242.34	34.67
12	6	2129.27	5768.73	36.91	1143.74	3160.74	36.19	564.02	1573.10	35.85
13	6.5	2728.74	7178.22	38.01	1472.41	3900.70	37.75	727.54	1957.76	37.16
14	7	3426.23	8812.52	38.88	1855.96	4617.69	40.19	918.38	2402.06	38.23
15	7.5	4225.46	10682.24	39.56	2293.62	5443.26	42.14	1136.13	2912.32	39.01



Gambar 8. Envelope beban-perpindahan

Efisiensi disipasi energi diobservasi melalui rasio E_{dk}/E_{ik} . **Tabel 2** dan **Tabel 3** menunjukkan bahwa L memiliki efisiensi energi disipasi yang lebih baik dibandingkan dengan BP untuk masing-masing panjang bresing. Pada akhir siklus ke-15, L1 menunjukkan efisiensi energi disipasi yang lebih besar 64.4 % dibandingkan dengan BP1. Efisiensi energi disipasi yang lebih baik pada L terindikasi, mengingat lacing meningkatkan kekakuan pada bresing ganda yang pada akhirnya meningkatkan penyerapan energi gempa terhadap energi input.

Gambar 8 mengilustrasikan kurva envelope untuk kedua penghubung, BP dan L. Kurva envelope berasal dari luasan histerisis hubungan beban perpindahan yang paling besar pada setiap benda uji, yang mengacu kepada nilai deformasi dan beban ultimit pada arah tarik dan tekan. Gambar 8 menunjukkan bahwa bresing yang lebih pendek memiliki histerisis yang lebih besar dibandingkan dengan bresing yang lebih panjang untuk BP dan L. Hal ini dimungkinkan mengingat bresing yang lebih pendek lebih sulit untuk mengalami tekuk dan memiliki kekuatan tekan yang lebih besar dibandingkan bresing yang lebih panjang. Peningkatan kekuatan tekan akan diikuti peningkatan kekuatan tarik, khususnya pada riwayat pembebanan siklik dengan kontrol perpindahan. Observasi perbedaan penghubung juga menunjukkan bahwa L memiliki histerisis yang lebih besar dibandingkan dengan BP yang mengacu kepada penyerapan energi gempa yang lebih baik.

Hal ini juga tergambar dari efisiensi energi disipasi yang telah dijelaskan sebelumnya. Bresing dengan penghubung L memiliki kekakuan batang yang lebih baik dibandingkan bresing dengan penghubung BP sehubungan kekakuan yang diberikan di sepanjang batang. Kekakuan yang lebih baik pada bresing berpenghubung L akan meningkatkan penyerapan energi gempa (disipasi energi).

4. KESIMPULAN

Studi ini menjabarkan hasil kajian eksperimental terhadap enam buah elemen bresing tersusun dari Sistem Rangka Baja Bresing Konsentrik (SRBK). Modifikasi dilakukan pada tipe pelat penghubung bresing, BP dan L. Selain itu, pengaruh panjang batang yang berbeda terhadap kinerja bresing juga diinvestigasi. Terdapat tiga parameter kinerja yang diteliti yaitu kekuatan, kekakuan, dan disipasi energi. Pengamatan pada variasi panjang memberikan informasi bahwa bresing yang lebih pendek memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan bresing panjang untuk BP dan L. Pengamatan pada variasi penghubung menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan untuk kekuatan dan kekakuan antara BP dan L. Sebaliknya, observasi pada disipasi energi dan kurva envelope menunjukkan bahwa L lebih baik daripada BP yang ditunjukkan melalui luasan histerisis lebih besar dan stabil. Dari penelitian yang dilakukan, pemanfaatan bresing ganda yang lebih pendek dengan penghubung lacing dapat disarankan sebagai solusi alternatif untuk desain bangunan tahan gempa.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. D. Sen, C. W. Roeder, D. E. Lehman, dan J. W. Berman. 2019. *Nonlinear modeling of concentrically braced frames*. J Constr Steel Res, vol. 157, pp. 103–120.
- [2] V. Mohsenazdeh dan L. Wiebe. 2020. *Experimental Investigation of a Concentrically Braced Frame with Replaceable Brace Modules*. Journal of Structural Engineering, vol. 146, no. 11.
- [3] Y. W. Li, G. Q. Li, F. F. Sun, dan J. Jiang. 2022. *Mitigating Inter-Story Drift Concentration of Concentrically Braced Steel Frames Using Energy-Dissipative Columns*. Journal of Earthquake Engineering, vol. 26, no. 1, pp. 221–239.
- [4] S. Babaei dan P. Zarfam. 2020. *Optimization of shape memory alloy braces for concentrically braced steel braced frames*. Open Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 697–708.
- [5] E. Xiong, K. Zu, dan Q. Zhang. 2020. *Seismic Performance Analysis of Self-Centering Concentrically Braced Steel Frame Structures*. Shock and Vibration, vol. 2020.
- [6] R. Chen, C. Qiu, dan D. Hao. 2020. *Seismic response analysis of multi-story steel frames using BRB and SCB hybrid bracing system*. Applied Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 1.
- [7] F. Barbagallo, M. Bosco, E. M. Marino, dan P. P. Rossi. 2018. *Behavior factor of dual systems with BRBs and semi-rigid connections*. Key Eng Mater, vol. 763, pp. 949–956.
- [8] S. Costanzo, M. D’Aniello, dan R. Landolfo. 2023. *Nonlinear Static Response of Low-Moderate Ductile Chevron Concentrically Braced Frames Designed According to Eurocode 8*. Buildings, vol. 13, no. 1.
- [9] M. Adali dan Y. Ozelik. 2018. *Collapse Assessment of Concentrically Braced Frame Designed to Turkish Building Earthquake Code 2018 by Using Incremental Dynamic Analysis*. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/346520989>
- [10] Y. Cui, W. Zhang, J. Zhang, dan Q. Tang. 2018. *Seismic Design of Gusset Plate Connections in Concentrically Braced Frames*. Key Eng Mater, vol. 763 KEM, pp. 141–148.
- [11] M. Naghavi, R. Rahnavard, R. J. Thomas, dan M. Malekinejad. 2019. *Numerical evaluation of the hysteretic behavior of concentrically braced frames and buckling restrained brace frame systems*. Journal of Building Engineering, vol. 22, pp. 415–428.
- [12] T. Y. Yang, H. Sheikh, dan L. Tobber. 2019. *Influence of the brace configurations on the seismic performance of steel concentrically braced frames*. Front Built Environ, vol. 5.
- [13] N. Mashhadiali dan A. Kheyroddin. 2018. *Seismic performance of concentrically braced frame with hexagonal pattern of braces to mitigate soft story behavior*. Eng Struct, vol. 175, pp. 27–40.
- [14] J. Aloysius, J. A. Sumito, D. Prayogo, dan H. Santoso. 2021. *Optimization of concentrically braced steel frame structures based on SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, SNI 1729:2020, and AISC 341-16*. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing Ltd.
- [15] P. Patra, P. C. Ashwin Kumar, dan R. D. Sahoo. 2018. *Cyclic performance of braces with different support connections in special concentrically braced frames*. Key Eng Mater, vol. 763, pp. 694–701.
- [16] Y. Jiang, R. Tremblay, dan L. Tirca. 2012. *Seismic assessment of deficient steel braced frames with built-up back-to-back double angle brace sections using OpenSees modeling*. in 15th World Conference in Earthquake Engineering, Sept. 24-28, 2012.