

PERILAKU SAMBUNGAN BALOK I DAN KOLOM TABUNG BAJA AKIBAT BEBAN SIKLIK

Hery Dualembang^{*1}, Muslikh², Andreas Triwiyono³

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Cenderawasih, Jayapura

^{2,3}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

e-mail: ^{*1}herydualembang@gmail.com, ²muslikh_jtsl@ugm.ac.id, ³andreas.triwiyono@ugm.ac.id

Abstract

Using Concrete-Filled Steel Tube (CFST) as a column component provides many advantages over steel columns and reinforced concrete columns. Steel tube serve as reinforcement as well as formwork for concrete filler material. Besides, restrain effect of steel tube prevent crack in the concrete. The concrete-filler on steel tube prevent local buckling and increases the strength and stiffness of the column. The lack of experience and complexity of the beam-column connection system becomes an obstacle to use the CFST as a column. In addition, strength and stiffness of the connection system on CFST should be sufficient to endure the earthquake loads. This research purpose to find alternate connection of CFST column beams and also to know hysterestis behavior, strength, stiffness and pattern of connection collapse due to cyclic loading. There are two specimens in this research, continuous joint of beam-column steel tube with concrete filler (BKM-T) and continuous joint of beam-column steel tube without concrete filler (BKM-K). BKM-K as a comparator to show an increasing strength and stiffness due to the concrete core. Load cycle of specimens refer to ACI 374.1-05. The test results showed the average maximum load (P_{peak}) of 32.59 kN on BKM-K increased to 34.08 kN on BKM-T. Elastic stiffness (K_e) at BKM-K of 0.78 kN/mm increased to 1.08 kN/mm on BKM-T. BKM-T also has a larger hysteretic loop than BKM-K. In addition, BKM-K and BKM-T adequate the strong column weak beam criteria with partial ductility.

Keywords— CFST, Cyclic test, Beam-column joint

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi menciptakan banyak inovasi-inovasi dalam dunia konstruksi, salah satunya adalah penggunaan struktur komposit tabung baja terisi beton penuh (CFST – Concrete-Filled Steel Tube). CFST memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan kolom baja dan kolom beton bertulang biasa (Johansson & Gylltoft, 2001). Akan tetapi, penggunaan elemen struktur ini terkendala pada sistem sambungan antara balok dengan kolom. Oleh karena itu pemilihan tipe sambungan yang kuat, kaku dan mudah dilaksanakan menjadi hal yang sangat penting. Dalam penelitian ini diharapkan bentuk sambungan yang efisien dapat dihasilkan, sehingga penggunaan struktur komposit ini bisa lebih luas digunakan.

Model eksperimen sambungan balok-kolom antara balok baja profil I dan kolom tabung pipa baja dengan maupun tanpa isian beton yang bertujuan untuk :

1. Mengetahui dan membandingkan perilaku histeresis sambungan menerus pada balok baja dan kolom tabung baja tanpa isian dan dengan isian beton yang mengalami pembebanan siklik;
2. Mengukur kekuatan dan kekakuan sambungan balok dan kolom tabung baja, serta pola keruntuhan yang terjadi akibat beban siklik;
3. Membandingkan antara teori dengan hasil pengujian sambungan dan memberikan saran perbaikan sambungan.

Penelitian mengenai perilaku sambungan balok dan kolom komposit CFST telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Schneider & Alostaz (1998) membuat beberapa bentuk sambungan skala besar yang diuji dengan menggunakan pedoman ATC-24, 1992 untuk

pengujian siklik. Hasil pengujian menyatakan bahwa sebuah diafragma berukuran minimum tidak efisien dalam mengurangi gaya geser yang besar pada dinding kolom tabung baja. Namun, kinerja detail ini memiliki peningkatan yang signifikan jika dibandingkan dengan detail sambungan yang dilas sederhana. Sambungan dengan tambahan pelat diafragma berdasarkan penelitian tersebut dapat digunakan di daerah dengan resiko gempa rendah (Schneider & Alostaz, 1998).

Qin et al (2014) melakukan penelitian eksperimental sambungan balok-kolom tabung persegi empat yang diisi beton (*CFRT - Concrete-Filled Rectangular Steel Tubular*). Pengujian dilakukan dengan mengikuti pedoman ANSI/AISC 341-10, 2010. Hasil penelitian menyatakan bahwa sambungan balok dan kolom *CFRT* dengan penambahan *haunch* lebih baik bila dibandingkan dengan sambungan biasa maupun dengan menggunakan pelat diafragma. Penggunaan *haunch* dengan ukuran kecil menambah kekakuan tetapi tidak meningkatkan kapasitas beban. Selain itu, penambahan *haunch* dengan ukuran besar pada sambungan balok dan kolom *CFRT* meningkatkan kapasitas beban, kekakuan maupun daktilitas sambungan (Qin et al, 2014).

Haykal (2015) dan Felni (2015) melakukan pengujian perilaku sambungan balok baja dan kolom tabung baja dengan isian beton yang diuji dengan menggunakan pedoman ACI T1.1-01, 2001 dan dengan mempertimbangkan peraturan SNI 1726:2012. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan memenuhi kaidah sambungan kolom-balok yang dapat digunakan pada sistem struktur rangka baja dan struktur rangka baja beton komposit tahan gempa pemikul momen biasa karena berdasarkan hasil pengujian, sambungan mempunyai kemampuan daktilitas yang cukup. (Haykal, 2015; Felni, 2015). Pada penelitian tersebut, pembebanan diberikan pada ujung balok dengan anggapan *drift ratio* merupakan perbandingan simpangan terhadap panjang balok sehingga kriteria penerimaan sesuai ACI T1.1-01 kurang dapat diterima.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan Bahan Penelitian

2.1.1 Alat penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini dibagi dalam dua bagian, yaitu :

1. Alat pengujian sambungan balok-kolom meliputi:
 - a. *Hydraulic Actuator*;
 - b. *Hydraulic Jack*;
 - c. *Load Cell*;
 - d. *Linear Variabel Differential Transformer (LVDT)*;
 - e. *Strain Gauge*;
 - f. *Data logger*;
 - g. Perangkat Komputer/Laptop;
 - h. *Hand Pallet dan Crane*.
2. Alat pengujian material meliputi:
 - a. *Compression Testing Machine*;
 - b. *Universal Testing Machine*.

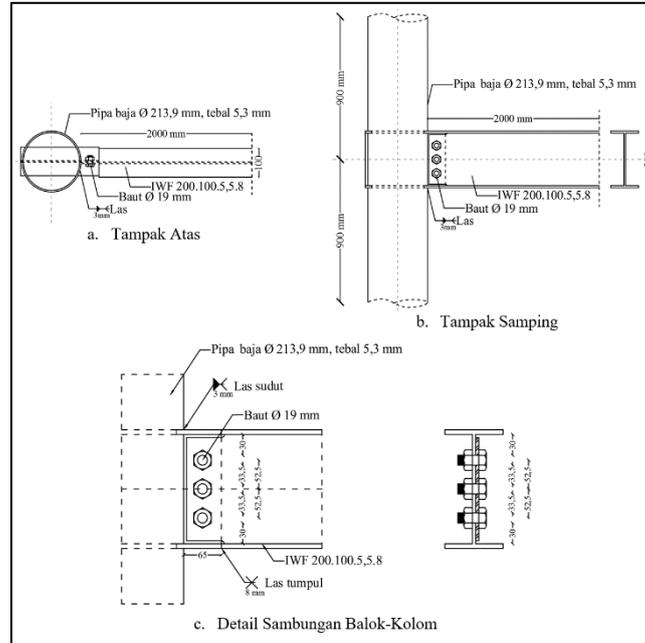
2.1.2 Bahan penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji meliputi :

1. Profil baja IWF 200.100.5,5.8;
2. Profil baja pipa diameter 213,9 mm (8 inch) dengan tebal 5,3 mm;
3. Baut tipe UNS 4.6 diameter 19 mm;
4. Beton normal.

2.2 Benda Uji

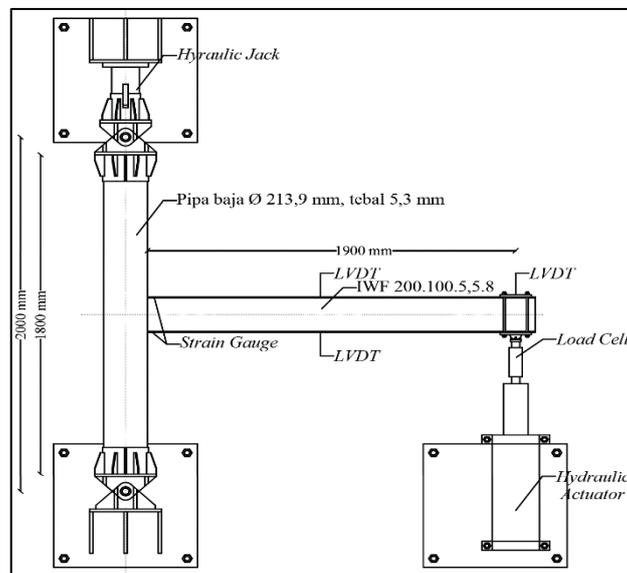
Penelitian ini dibuat 2 buah benda uji, yaitu 1 (satu) buah benda uji sambungan balok-kolom tabung baja tanpa isian beton (BKM-K) dan 1 (satu) buah benda uji sambungan balok-kolom tabung baja dengan isian beton (BKM-T). Detail benda uji dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Detail benda uji

2.3 Pengujian Sambungan Balok-Kolom

Pengujian dilakukan setelah beton pengisi pada kolom tabung baja telah mencapai umur 28 hari. Pembebanan siklik dilakukan dengan beban terhadap *displacement controlled* seperti yang disyaratkan dalam ACI 374.1-05. *Set-up* pengujian dapat dilihat pada Gambar 2.



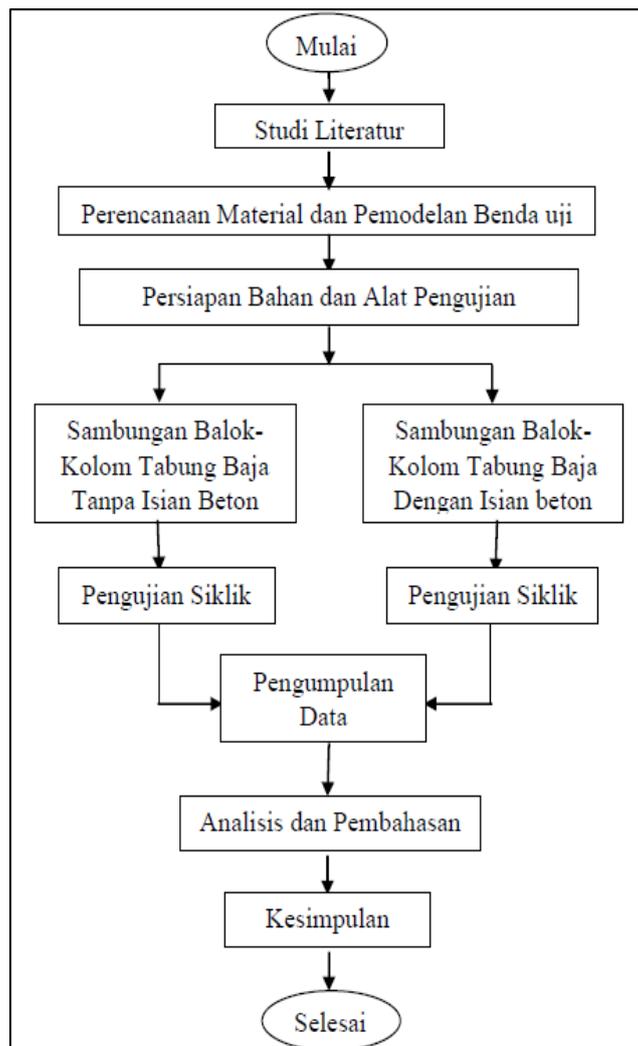
Gambar 2. Set-up Pengujian

2.4 Tahapan Pengumpulan dan Pengolahan Data

Tahap pengumpulan data dibagi menjadi dua bagian. Pertama, pengumpulan data berdasarkan pengamatan parameter pada material berupa pengamatan karakteristik dari masing-masing material untuk selanjutnya dijadikan acuan dalam pembuatan benda uji. Kedua, pengumpulan data berupa pengamatan parameter pada pengujian benda uji. Setelah pengumpulan data, dilakukan analisis atau pengolahan data menggunakan alat bantu komputer. Hasil yang diperoleh dari pengujian berupa hubungan beban dan defleksi membentuk kurva histerisis yang akan dianalisis terhadap kekuatan, kekakuan, dan energi yang diserap. Peningkatan akibat adanya inti beton akan dibandingkan dengan kondisi tabung baja kosong. Dari 2 (dua) buah benda uji akan diamati tipe kerusakannya serta rekomendasi sambungan yang paling efektif dan efisien.

2.5 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Bahan

3.1.1 Profil baja

Pengujian mutu baja dilakukan pada profil baja pipa dan profil baja IWF dengan mengambil sampel baja masing-masing sebanyak 3 (tiga) buah. Hasil pengujian tarik profil baja dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja Profi

Benda Uji	f_y (MPa)	f_y rata-rata (MPa)	f_u (MPa)	f_u rata-rata (MPa)
Pipa Baja	337,71	341,55	410,52	409,99
	345,65		410,71	
	341,30		408,74	
IWF Badan	347,68	335,76	463,57	453,60
	332,03		449,22	
	327,57		448,00	
IWF Sayap	284,88	282,29	435,10	432,95
	282,02		428,25	
	279,96		435,49	

3.1.2 Baut

Pengujian mutu baja dilakukan pada baut baja dengan mengambil sampel baut baja sebanyak 3 (tiga) buah. Hasil pengujian tarik baut baja dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baut

Benda Uji	f_y (MPa)	f_y rata-rata (MPa)	f_u (MPa)	f_u rata-rata (MPa)
Baut UNS 4.6	403,41	400,18	576,31	571,68
	393,74		562,48	
	403,38		576,25	

3.1.3 Beton silinder

Benda uji beton berupa silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm sebanyak 5 (lima) buah. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada saat beton telah mencapai umur 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

No.	Kode	f_c' (MPa)	f_c' rata-rata (MPa)
1	A	25,18	25,41
2	B	25,75	
3	C	25,46	
4	D	25,18	
5	E	25,46	

3.2 Pengujian Sambungan

3.2.1 Persyaratan umum struktur baja tahan gempa

A. Mekanisme Strong Column Weak Beam

Benda uji BKM-K dan BKMT, masing-masing profil sambung mengalami leleh pada *drift ratio* yang sama yaitu 1%, dengan beban lateral rata rata dari ketiga siklus berturut-turut

sebesar 13,75 kN dan 17,14 kN untuk beban tekan dan untuk beban tarik sebesar 15,33 dan 17,40 kN. Sedangkan, kolom baja pipa tidak terisi beton maupun terisi dengan beton secara visual sama sekali tidak mengalami keruntuhan. Tanpa adanya kerusakan pada kolom maka BKM-K maupun BKM-T dapat dikatakan memenuhi kriteria *strong column weak beam*.

B. Daktilitas

Hasil analisis dari masing-masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.

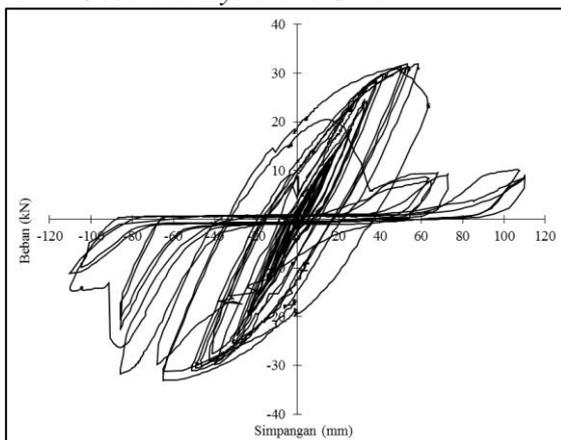
Tabel 4. Faktor Daktilitas

No.	Benda Uji	Defleksi Yield Δ_y (mm)	Defleksi ultimit Δ_u (mm)	Faktor Daktilitas	
				μ	μ rata-rata
1	BKM-K				
	Tekan	40,992	60,530	1,477	1,954
	Tarik	38,255	93,025	2,432	
2	BKM-T				
	Tekan	27,533	65,854	2,392	2,402
	Tarik	27,539	66,410	2,411	

Syarat SRPMK untuk daktilitas adalah daktilitas penuh, sedangkan daktilitas BKM-K dan BKM-T adalah daktilitas parsial sehingga tidak memenuhi syarat SRPMK Berdasarkan persyaratan dalam SNI-1726-2012, untuk sistem struktur rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa memiliki nilai C_d sebesar 2,5 dan untuk sistem struktur rangka baja pemikul momen biasa diambil nilai C_d sebesar 3, BKM-K dan BKM-T memenuhi persyaratan daktilitas yang telah ditentukan.

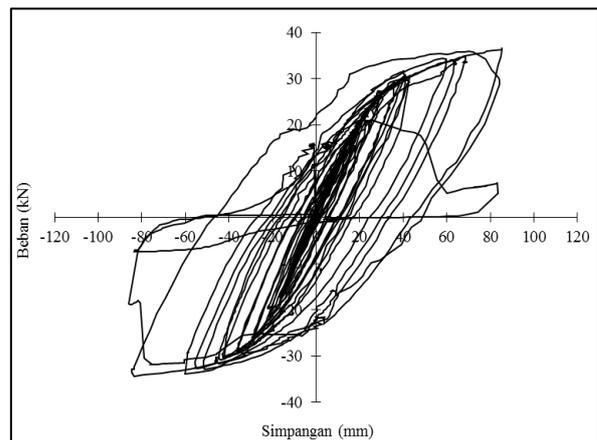
3.2.2 Hubungan Beban dan Displacement

A. Observed Hysteretic Curve



Gambar 4. Observed Hysteretic Curve

BKM-K



Gambar 5. Observed Hysteretic Curve

BKM-T

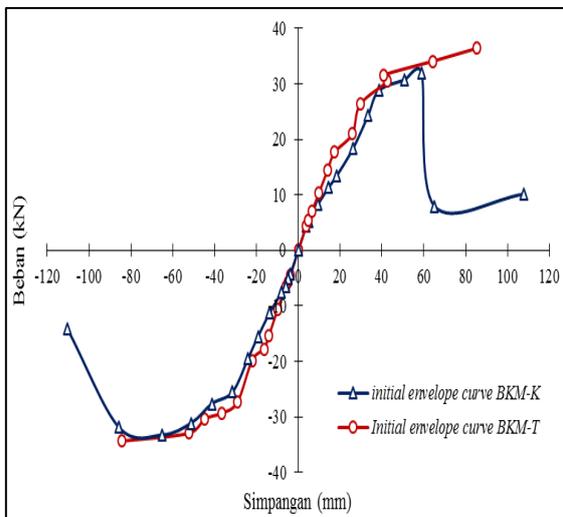
Grafik hubungan antara beban dan displacement dari hasil pengujian BKM-K pada Gambar 4 menunjukkan bahwa pada arah beban positif, beban puncak mencapai 31,95 kN terjadi saat siklus pertama *drift ratio* 3,5%. Siklus kedua *drift ratio* 3,5% terjadi penurunan sebesar 25,84% dari beban puncak menjadi 23,69 kN dan pada siklus ketiga penurunan terjadi hingga 70,03% dari beban puncak menjadi 9,67 kN. Beban puncak pada arah beban negatif mencapai 33,23 kN pada saat siklus pertama *drift ratio* 3,5%. Pada siklus ketiga *drift ratio* 3,5%

arah beban negatif, terjadi penurunan 10,48% menjadi 29,79 kN dan pada siklus pertama *drift ratio* 5,75% terjadi penurunan beban hingga 57,26% dari beban puncak menjadi 14,20 kN. Pada Gambar 5 kapasitas beban lateral BKM-T mengalami peningkatan seiring dengan penambahan *displacement*. Beban puncak pada arah beban positif mencapai 36,40 kN pada siklus pertama *drift ratio* 4,5% dan pada siklus kedua dan ketiga berturut-turut terjadi penurunan sebesar 18,7% dan 79,45% dari beban puncak menjadi 29,59 kN dan 7,48 kN. Beban puncak mencapai 34,36 kN pada siklus pertama *drift ratio* 4,5% arah beban negatif. Terjadi penurunan beban berturut-turut sebesar 45,63% dan 78,39% dari beban puncak atau sebesar 18,68 kN dan 7,42 kN pada siklus kedua dan ketiga *drift ratio* 4,5%. Penurunan kapasitas beban disebabkan oleh karena adanya kondisi lelah akibat beban siklik.

Beban puncak benda uji BKM-T lebih besar dibandingkan dengan beban puncak BKM-K. Hal ini disebabkan karena adanya pengisi beton pada kolom BKM-T yang menyebabkan peningkatan kekakuan. Selain itu, benda uji BKM-T memiliki *hysteretic loops* yang lebih besar dari BKM-K, sehingga disipasi energi yang dimiliki oleh BKM-T lebih besar dari BKM-K.

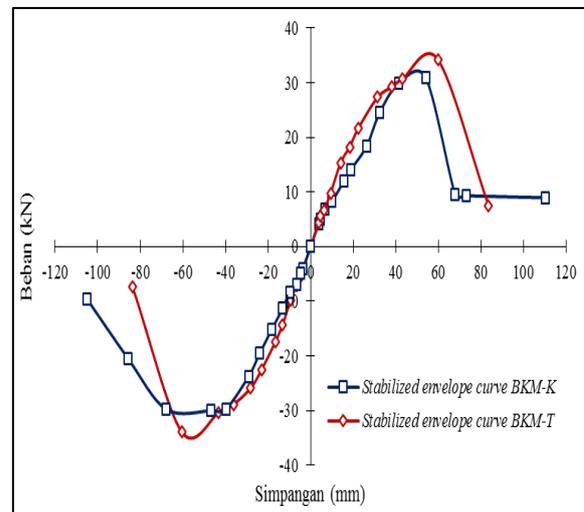
B. Envelope Curve

Envelope Curve dari hasil pengujian BKM-K dan BKM-T dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Initial Envelope Curve

BKM-K dan BKM-T



Gambar 7. Stabilized Envelope Curve

BKM-K dan BKM-T

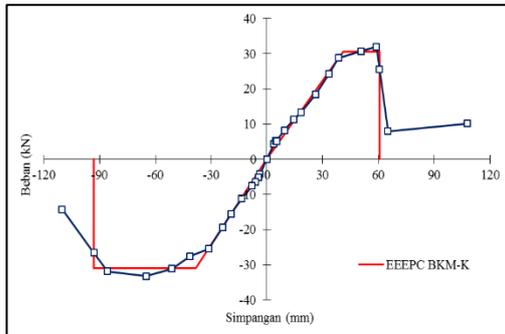
Gambar 6 dan Gambar 7, terlihat bahwa kapasitas beban pada tiap siklus BKM-T lebih besar dari kapasitas beban benda uji BKM-K. Penurunan kapasitas beban pada kedua benda uji terjadi pada tren yang masih memperlihatkan kenaikan. Hal ini terjadi karena kegagalan pada sambungan las. Kegagalan pada las menyebabkan keruntuhan secara getas yang mengurangi daktilitas sambungan. Salah satu alternatif untuk memastikan terjadi sendi plastis pada balok yaitu dengan melakukan modifikasi sambungan *reduced beam section*.

3.2.3 Equivalent energy elastic-plastic curve (EEEPC)

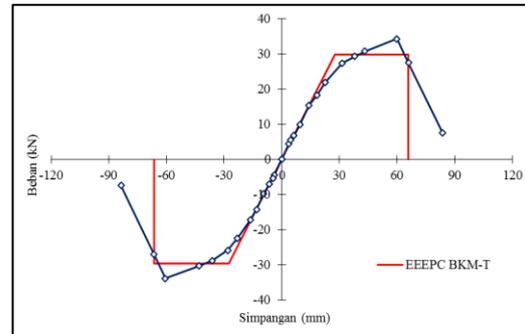
Stabilized Envelope Curve, Hasil analisis *EEEPC* BKM-K dan BKM-T dapat dilihat pada Tabel 5 dan disajikan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Tabel 5. Beban dan Defleksi *Crack, Yield, Peak* dan *Failure*

No	Benda Uji	<i>Crack</i>		<i>Yield</i>		<i>Peak</i>		<i>Failure</i>		μ
		Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	
1	BKM-K									
	Tekan	17,16	12,78	40,99	30,52	58,89	30,95	60,53	25,56	1,48
	Tarik	16,36	13,29	38,25	31,08	65,06	33,23	93,02	26,59	2,43
2	BKM-T									
	Tekan	12,69	13,70	27,53	29,73	59,76	34,25	65,85	27,40	2,39
	Tarik	12,56	13,56	27,54	29,73	60,51	33,90	66,41	27,12	2,41



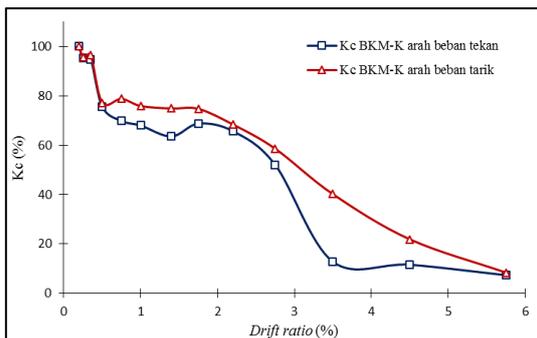
Gambar 8. *Equivalent Energy Elastic-Plastic Curve (EEEEPC) BKM-K*



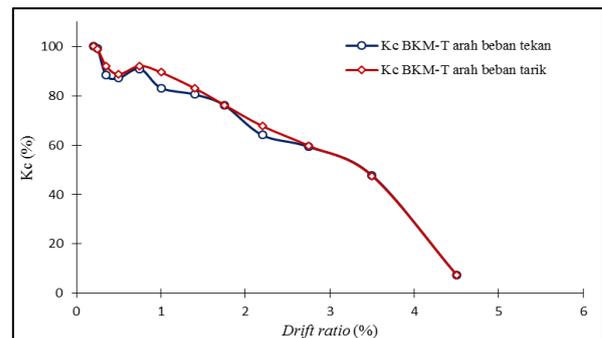
Gambar 9. *Equivalent Energy Elastic-Plastic Curve (EEEEPC) BKM-T*

Kekakuan elastis BKM-K untuk beban tekan dan tarik berturut-turut sebesar 0,74 kN/mm dan 0,81 kN/mm, sedangkan pada BKM-T sebesar 1,08 kN/mm.

3.2.4 Kekakuan siklus (K_c)



Gambar 10. Kekakuan Siklus (K_c) BKM-K

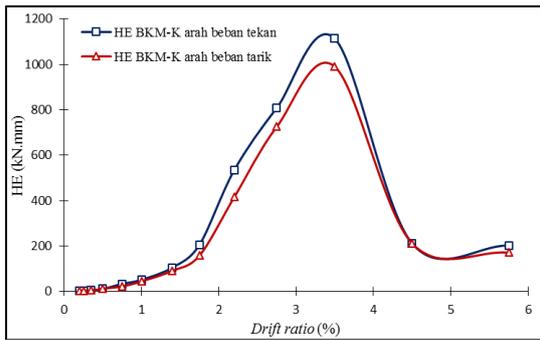


Gambar 11. Kekakuan Siklus (K_c) BKM-T

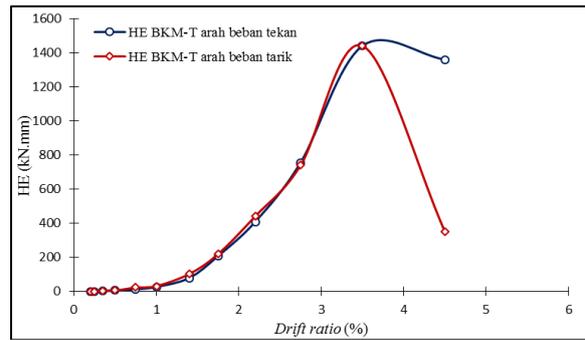
Kekakuan siklus (K_c) tiap *drift ratio* pada BKM-K dan BKM-T dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Kekakuan siklus BKM-T dan BKM-K mengalami penurunan seiring dengan pertambahan *drift ratio*.

3.2.5 Hysteretic energy (HE)

Hysteretic loop (HE) untuk BKM-K dan BKM-T dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Hysteretic Energy (HE) BKM-K

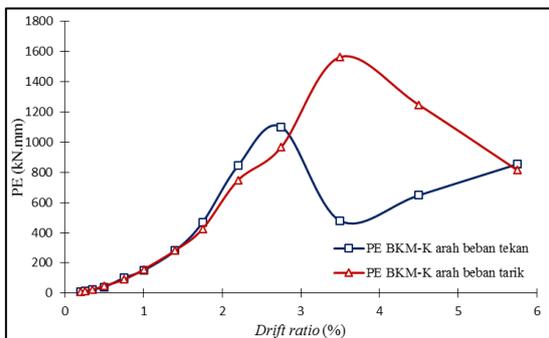


Gambar 13. Hysteretic Energy (HE) BKM-T

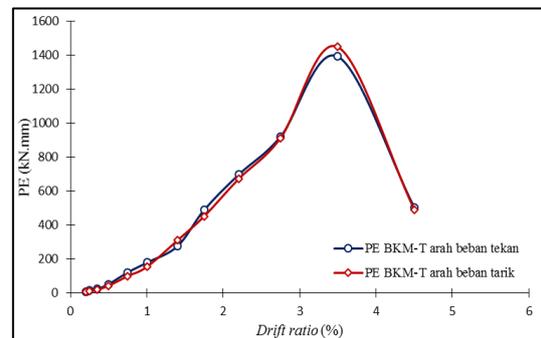
Benda uji BKM-T memiliki *hysteretic energy* yang lebih besar dari benda uji BKM-K. Hasil analisis menunjukkan bahwa benda uji BKM-T memiliki redaman yang lebih baik dari pada benda uji BKM-K.

3.2.6 Potential energy (PE)

Hasil perhitungan *Potential Energy (PE)* pada benda uji BKM-K dan BKM-T dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14. Potential Energy (PE) BKM-K

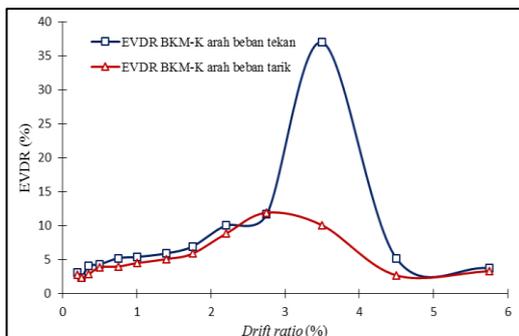


Gambar 15. Potential Energy (PE) BKM-T

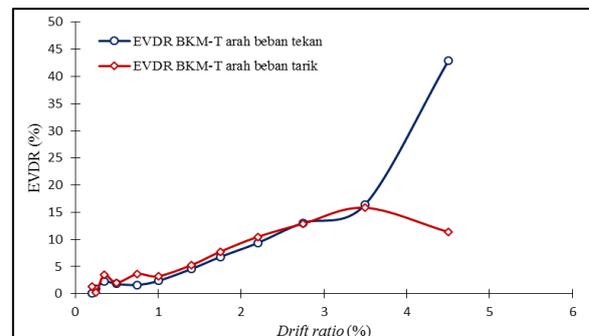
Gambar 14 dan Gambar 15 di atas terlihat bahwa benda uji BKM-T memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan benda uji BKM-K.

3.2.7 Equivalent viscous damping ratio (EVDR)

Nilai *EVDR* dari masing-masing benda uji dapat dilihat Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. EVDR BKM-K



Gambar 17. EVDR BKM-T

Hasil analisis menunjukkan bahwa Nilai EVDR BKM-T lebih besar dari BKM-K. Semakin besar nilai *equivalent viscous damping ratio (EVDR)*, maka semakin besar pula

kemampuan struktur untuk menyerap energi.

3.2.8 Kekuatan sambungan

Pengujian diperoleh beban maksimum sebesar 31,95 kN dan 33,23 kN untuk beban tekan dan tarik benda uji BKM-K, sedangkan pada benda uji BKM-T sebesar 34,35 kN dan 33,92 kN untuk beban tekan dan tarik. Kekuatan balok dengan analisis penampang plastis mencapai M_p dengan beban P_u sebesar 27,94 kN. Penyambungan sayap balok pada sambungan menggunakan las tumpu penetrasi penuh, tahanan nominal sambungan las sebesar 352,8 kN lebih besar dari tahanan leleh pelat sayap yaitu sebesar 255,18 kN sehingga asumsinya kegagalan terjadi pada pelat sayap. Akan tetapi pada pengujian, kegagalan terjadi pada sambungan las. Kegagalan pada las menyebabkan keruntuhan secara tiba-tiba ditandai dengan penurunan beban secara drastis pada hubungan beban dan simpangan yang masih memperlihatkan tren kenaikan. Selain memberikan modifikasi sambungan *reduced beam section* agar memastikan kegagalan pada balok, sambungan las pada pelat sayap yang berperilaku getas dapat diganti dengan menggunakan sambungan pelat dan baut.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Haykal, 2015 dan Felny, 2015), hasil pengujian memperlihatkan adanya peningkatan kekuatan dan kekakuan akan tetapi, akibat terjadinya kegagalan pada sambungan las yang mengakibatkan keruntuhan yang bersifat getas, nilai daktilitas baik pada benda uji BKM-K maupun BKM-T mengalami penurunan dari nilai daktilitas penelitian sebelumnya (Haykal, 2015 dan Felny, 2015). Adapun perbandingan besarnya nilai kekuatan, kekakuan dan daktilitas dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Pengujian dengan Hasil Penelitian Sebelumnya (Haykal, 2015 dan Felny, 2015)

	Kondisi Beban	Tanpa Isian Beton			Dengan Isian Beton		
		BKM-K	BKDM-T (Felni, 2015)	BKD-T (Haykal, 2015)	BKM-T	BKDM-K (Felni, 2015)	BKM-K (Haykal, 2015)
$P_{maksimum}$ (kN)	Tekan	31,95	26,92	24,77	34,25	33,29	27,45
	Tarik	-33,23	-31,24	-28,55	-33,90	-33,13	-32,46
K_e (kN/mm)	Tekan	0,74	0,86	0,93	1,08	1,05	1,05
	Tarik	0,81	0,9	0,82	1,08	0,99	1,05
Daktilitas	Tekan	1,48	4,97	3,17	2,39	3,21	2,40
	Tarik	2,43	2,96	3,07	2,41	2,74	2,39

3.2.9 Pola keruntuhan

Pengamatan pola retak dilakukan terus menerus mulai dari awal hingga akhir pengujian. Keruntuhan yang terjadi pada benda uji BKM-K maupun BKM-T adalah tipe keruntuhan lelah (*fatigue failure*). Keruntuhan lelah terjadi akibat pemberian beban siklik yang menyebabkan sistem sambungan menjadi getas dan akhirnya gagal. Adanya pelat badan pada profil sambungan dan balok menjadi pengaku untuk pelat sayap sehingga menyebabkan sambungan las menjadi bagian terlemah, akibatnya terjadi kegagalan pada sambungan las. Kegagalan pada benda uji BKM-K dan BKM-T dapat dilihat pada gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18. Kegagalan benda uji



Gambar 19. Kegagalan benda uji

4. KESIMPULAN

1. Benda uji BKM-T memiliki *hysteretic loops* yang lebih besar bila dibandingkan dengan benda uji BKM-K, *hysteretic energy* yang lebih besar dari benda uji BKM-K. Hal ini menunjukkan bahwa benda uji BKM-T memiliki redaman yang lebih baik dari pada benda uji BKM-K. Pada *hysteretic curve*, benda uji BKM-K dan BKM-T mengalami penurunan beban pada tren yang masih memperlihatkan kenaikan;
2. Kapasitas beban maksimal untuk benda uji BKM-K diperoleh sebesar 31,95 kN dan -33,23 kN. Sedangkan benda uji BKM-T sebesar 34,25 kN dan -33,90 kN. Kekakuan elastis benda uji BKM-K sebesar 0,74 kN/mm pada beban tekan dan 0,81 kN/mm pada beban tarik, sedangkan pada benda uji BKM-T sebesar 1,08 kN/mm untuk beban tekan maupun tarik. Keruntuhan terjadi pada benda uji BKM-K maupun BKM-T adalah tipe keruntuhan lelah (*fatigue failure*). Daktilitas yang terjadi adalah daktilitas parsial sehingga mekanisme keruntuhan benda uji BKM-K dan benda uji BKM-T tidak sesuai dengan mekanisme kapasitas desain dalam SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus);
3. Hasil dari pengujian BKM-K dan BKM-T tidak berbeda jauh dengan teori, Benda uji BKM-K maupun BKM-T mengalami kegagalan pada sambungan las. Sambungan las pada sayap yang kegagalannya bersifat getas dapat digantikan dengan sambungan menggunakan pelat dan baut. Selain itu sendi plastis pada balok dapat dipastikan dengan melakukan modifikasi sambungan *reduced beam section* pada sayap ujung balok. Tanpa adanya kegagalan pada kolom maka sambungan memenuhi kriteria "*strong column weak beam*".

5. SARAN

Adapun saran berdasarkan pembuatan dan pengujian benda uji di laboratorium sebagai berikut :

1. Kondisi dan kapasitas maksimum LVDT perlu diperhatikan, terutama untuk pengujian dengan simpangan yang besar sehingga tidak perlu mengubah posisi LVDT. Hal ini terkait dengan ketelitian dalam pengujian;
2. Diperlukan pengujian kriteria penerimaan sambungan untuk memastikan tipe sambungan dapat memenuhi kriteria sesuai dengan kondisi seismik pada standard Indonesia yang berlaku;
3. Perlu dilakukan pemodelan analisis numerik terhadap bentuk sambungan balok dan kolom tabung baja dengan isian beton.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ACI 374.1-05, 2005, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*, American Concrete Institute.
- [2] ANSI/AISC 360-10, 2010, *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- [3] ASTM E 2126-02a, 2002, *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings*, American Standard Testing and Material. United States.
- [4] Badan Standarisasi Nasional, 2000, SNI 03-2834-2000, mengenai tata cara pembuatan rencana campuran beton normal, Jakarta.
- [5] Badan Standarisasi Nasional, 2002, SNI 03-1729-2002, *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*, Jakarta
- [6] Badan Standarisasi Nasional, 2012, SNI 1726-2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Jakarta.
- [7] Badan Standarisasi Nasional, 2015, SNI 1729-2015, *Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Jakarta.
- [8] Bradford, M. A., 1996, *Design Strength of Slender Concrete-Filled Rectangular Steel Tubes*, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 2, pp. 229-235.
- [9] Felni, F., 2015, *Perilaku Sambungan Balok Baja Dan Kolom Tabung Baja Dengan Isian Beton Menggunakan Pelat Diafragma Menerus Akibat Beban Siklik*, Tesis, Program Studi S2 Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [10] Haykal, M., 2015, *Perilaku Sambungan Balok Baja Dan Kolom Tabung Baja Dengan Isian Beton Menggunakan Pelat Diafragma Melingkar Akibat Beban Siklik*, Tesis, Program Studi S2 Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [11] Imran, I. dan Hendrik, F., 2010, *Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*, Institiut Teknologi Bandung, Bandung.
- [12] Johansson, M., dan Gylltoft, K., 2001, *Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application*, Steel and Composite Structure, Vol. 1, No. 4, pp. 393-410.
- [13] Qin, Y., Chen, Z., Wang, X., dan Zhou, T., 2014, *Seismic Behavior of Through-Diaphragm Connections Between CFRT Columns and Steel Beams-Experimental Study*, Advanced Steel Construction Vol. 10, No. 3, pp. 351-371
- [14] Schneider, S. P. dan Alostaz, Y. M., 1998, *Experimental Behavior of Connections to Concrete-Filled Steel Tubes*. J. Construct. Steel Res. Vol. 45, No. 3, pp. 321-352.
- [15] Tjokordimuljo, K., 2007, *Teknologi Beton*, Biro Penerbit Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.