

PERILAKU SAMBUNGAN BALOK BAJA DAN KOLOM TABUNG BAJA BERISI BETON DENGAN PELAT DIAFRAGMA MELINGKAR AKIBAT BEBAN SIKLIK

Muhammad Haykal¹, Muslikh², Djoko Sulisty³, Christopher Triyoso⁴, Fitro Darwis⁵, Elfira Resti Mulya^{6*}

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada,

^{5,6}Program Studi Teknik Sipil Universitas Pasifik Morotai, resti.mulya@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan kolom tabung baja diisi beton (*Concrete Filled Steel Tube*) masih terbatas karena kurangnya pengalaman pelaksanaan dan kerumitan bentuk sambungan pada kolom komposit ini. Selain itu sambungan pada sistem CFST harus memiliki kekuatan yang cukup dalam menahan beban gempa. Tujuan penelitian ini untuk memverifikasi bentuk sambungan yang cocok untuk kondisi gempa sesuai standar Indonesia, serta mendapatkan bentuk sambungan pada balok dan kolom tabung baja komposit yang efisien dan mudah dilaksanakan di lapangan. Dalam penelitian ini dibuat dua buah benda uji yaitu benda uji sambungan balok-kolom tabung baja tanpa isian beton (BKD-T) sebagai pembanding untuk melihat peningkatan kekuatan akibat adanya inti beton, dan benda uji sambungan balok-kolom tabung baja dengan isian beton (BKD-K). Bentuk sambungan antara kolom tabung baja dan balok baja IWF dibuat dengan tambahan pelat diafragma melingkar yang menghubungkan sayap profil balok ke kolom tabung baja. Benda uji dibebani dengan siklus beban yang mengacu pada ACI T1.1-01. Hasil pengujian menunjukkan benda uji sambungan balok-kolom tabung baja tanpa isian beton (BKD-T) dapat digunakan pada sistem struktur rangka baja pemikul momen biasa dengan kategori desain seismik B dan C dengan nilai R (faktor modifikasi respon) maksimum diambil 3,5. Adapun benda uji sambungan balok-kolom tabung baja dengan isian beton (BKD-K) dapat digunakan pada sistem struktur rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa dengan kategori desain seismik B dengan nilai R (faktor modifikasi respon) maksimum diambil 3.

Kata kunci : CFST, join balok-kolom, gempa, kriteria penerimaan

Penerbit : Fakultas Teknik Universitas Pasifik Morotai

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan kolom tabung baja diisi beton (CFST - *Concrete Filled Steel Tube*) memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan kolom baja dan kolom beton bertulang biasa. Beberapa keuntungan antara lain : tabung baja berfungsi juga sebagai bekisting untuk inti beton, dengan adanya material pengisi beton pada tabung baja, kuat tekan tabung baja atau pipa terhadap gaya aksial juga akan meningkat. Selain itu tabung baja atau pipa juga berfungsi untuk mencegah keretakan pada beton, dan kolom komposit jauh meningkatkan kekakuan dan kekuatan yang signifikan. Namun, penggunaan kolom tabung baja diisi beton masih terbatas karena kurangnya pengalaman pelaksanaan dan kerumitan bentuk sambungan pada kolom komposit ini. Selain

itu sambungan pada sistem CFST harus memiliki kekuatan yang cukup dalam menahan beban gempa, serta memenuhi kriteria penerimaan.

Penelitian mengenai perilaku sambungan balok baja dan kolom tabung baja dengan isian beton telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan cukup beragam. Beberapa pengujian yang dilakukan oleh Kanatani et al., (1987), Prion (1992), dan McLellan (1992) dengan menggunakan sambungan baut ke kolom tabung persegi. Kanatani menggunakan sambungan WF dengan batang WF dibaut ke gelagar flens dan menyambungkan flens WF ke kolom dengan baut yang menerus melalui CFST tersebut. Perilaku ini umumnya dibatasi oleh adanya kekuatan sayap WF. Prion (1992) menguji sambungan yang sama, namun pelat dudukan ujungnya dilas pada balok. Bagian ujung pelat dudukan yang terhubung pada kolom tabung baja terisi beton (CFT) kemudian menggunakan baut yang menerus melalui kolom tabung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas geser yang baik diperoleh dari kedalaman baut. Akan tetapi perlu diketahui bahwa baut mengalami tegangan geser dan lentur karena eksentrisitas yang besar (Kanatani et. al., 1987).

Valbert (1968) pengujian dilakukan terhadap lebar sayap balok baja yang terhubung secara khusus ke kolom tabung baja yang terisi beton penuh. Sambungan dibuat dengan pengelasan pada sayap dan badan balok ke dinding tabung. Dalam tes tersebut, Valbert menerapkan tekanan ke kolom, dan beban secara monotonik di ujung gelagar kantilever. Selama pengujian dukungan untuk benda uji menjadi tidak stabil, sehingga hanya keterangan kualitatif tentang pengujian yang dilaporkan. Kegagalan sambungan itu umumnya dikaitkan dengan penyimpangan geser yang tinggi, dan akhirnya terjadi sobekkan pada dinding tabung baja.

Schneider & Alostaz (1998) membuat beberapa bentuk sambungan skala besar yang diuji dengan menggunakan pedoman ATC-24 untuk pengujian siklik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelasan potongan sambungan langsung ke permukaan tabung baja mengakibatkan terjadinya deformasi yang besar pada dinding tabung. Besarnya deformasi pada dinding tabung yang terbuat dari flens girder, las flens, dinding tabung tersebut sangat rentan terhadap kegagalan. Perilaku siklik inelastis membaik ketika diafragma eksternal digunakan untuk mendistribusikan kekuatan flens di sekitar tabung, dan sambungan mampu mengembangkan kekuatan lentur dari balok utama. Memperpanjang potongan sambungan girder melalui seluruh kolom tabung baja diisi beton cukup baik untuk meningkatkan kekuatan plastis lentur dari girder yang terhubung, dan menunjukkan kinerja siklik inelastis yang menguntungkan. Adapun diafragma berukuran minimum tidak efisien dalam mengurangi gaya geser yang besar pada dinding kolom tabung baja. Sambungan dengan tambahan diafragma berukuran minimum berdasarkan penelitian tersebut dapat digunakan di daerah resiko gempa rendah.

Dari uraian diatas, maka dilakukan pengembangan penelitian secara eksperimental untuk mempelajari perilaku sambungan pelat diafragma melingkar pada balok baja dan kolom tabung baja. Penelitian ini dianggap perlu, karena merupakan pengembangan dari penelitian analisis dan eksperimental sebelumnya. Perbedaan antara penelitian ini dengan penelitian – penelitian sebelumnya terletak pada bentuk sambungan dan pembebanan sikliknya, serta kriteria penerimaan pengujian sambungan berdasarkan ACI Standard (ACI T.1-01), sehingga sepengetahuan penulis belum pernah ada penelitian yang sama dengan penelitian ini.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian ini untuk memverifikasi bentuk sambungan yang cocok untuk kondisi gempa sesuai standar Indonesia, serta mendapatkan bentuk sambungan pada balok baja dan kolom tabung baja tanpa isian beton maupun dengan isian beton yang efisien dan mudah dilaksanakan di lapangan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini meliputi :

- 1) Beton pengisi kolom tabung baja yang digunakan adalah beton normal dengan kekuatan rencana $f_c' = 20$ MPa. Adapun profil baja dan tipe baut baja yang digunakan dengan mutu sesuai dengan bahan yang diperoleh di pasaran.
- 2) Penelitian ini mengacu pada ACI Standard (ACI T.1-01), serta kriteria penerimaan pengujian sambungan berdasarkan ACI Standard (ACI T.1-01).
- 3) Beban yang diaplikasikan untuk eksperimen ini adalah beban siklik, dengan posisi pembebanan terletak di ujung balok.
- 4) Perilaku momen dan rotasi yang terjadi pada kolom akibat pembebanan siklik pada balok diabaikan.
- 5) Penelitian ini hanya terfokus pada sambungan dengan pelat diafragma melingkar yang menghubungkan sayap profil balok baja ke kolom tabung baja eksterior.

2 METODE PENELITIAN

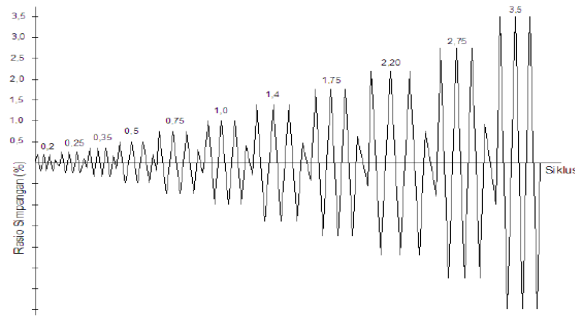
2.1 Perancangan Benda Uji

Perancangan skala dan dimensi benda uji pada penelitian ini didasarkan pada kapasitas peralatan Laboratorium *Mechanics of Material* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada. Perhitungan dan analisis gaya dalam dilakukan dengan menggunakan metode LRFD.

2.2 Ketentuan Pengujian

Ketentuan Pengujian dalam penelitian ini diatur dalam ACI T1.01, antara lain :

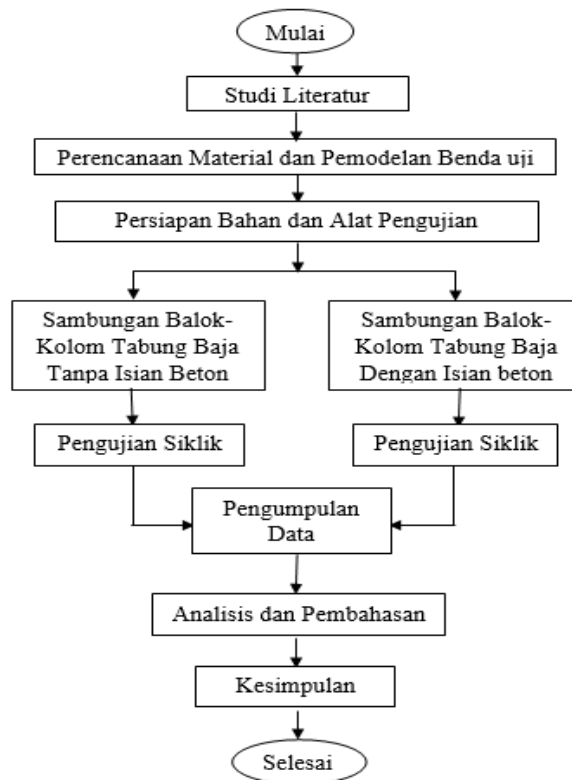
- 1) Benda uji harus dibebani oleh rangkain urutan siklus kontrol perpindahan yang mewakili *drift* yang diharapkan terjadi pada sambungan disaat gempa.
- 2) Tiga siklus penuh harus diaplikasikan pada setiap *ratio drift* (Gambar 1)
- 3) *Ratio drift* awal harus berada dalam rentang perilaku elastik linier benda uji. *Ratio drift* berikutnya harus bernilai tidak kurang dari pada $1\frac{1}{4}$ kali, dan tidak lebih dari pada $1\frac{1}{2}$ kali *ratio drift* sebelumnya (Gambar 1).
- 4) Pengujian harus dilakukan dengan meningkatkan *ratio drift* secara bertahap hingga tercapai nilai *ratio drift* minimum 0,035.
- 5) Data yang diperlukan untuk menginterpretasikan kinerja benda uji secara kualitatif harus direkam. Data *ratio drift* benda uji versus gaya geser kolom harus direkam secara menerus. Dokumen foto yang memperlihatkan kondisi benda uji disetiap akhir siklus pembebanan harus diambil.



Gambar 1. Siklus pembebanan dengan kontrol perpindahan (ACI Standard, ACI T1.1, 2001)

2.3 Bagan Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai dari studi literatur, perencanaan material dan pemodelan benda uji hingga penarikan kesimpulan yang dapat dilihat dalam bagan alir penelitian pada Gambar 2.

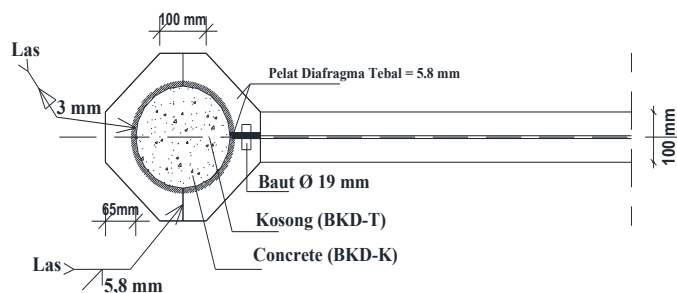


Gambar 2. Bagan alir penelitian

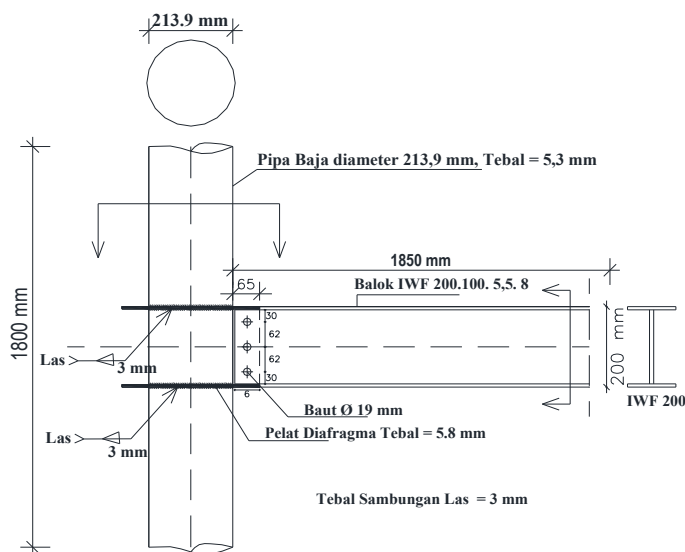
2.4 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dibuat berdasarkan kapasitas peralatan Laboratorium *Mechanics of Material* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada serta pengembangan dari hasil penelitian-penelitian sebelumnya. Pada

penelitian ini dibuat 2 buah benda uji, yaitu 1 buah benda uji sambungan balok-kolom tabung baja tanpa isian beton (BKD-T) sebagai pembanding, dan 1 buah benda uji sambungan balok-kolom tabung baja dengan isian beton (BKD-K). Detail benda uji dapat dilihat pada Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 3. Tampak atas benda uji



Gambar 4. Tampak samping benda uji

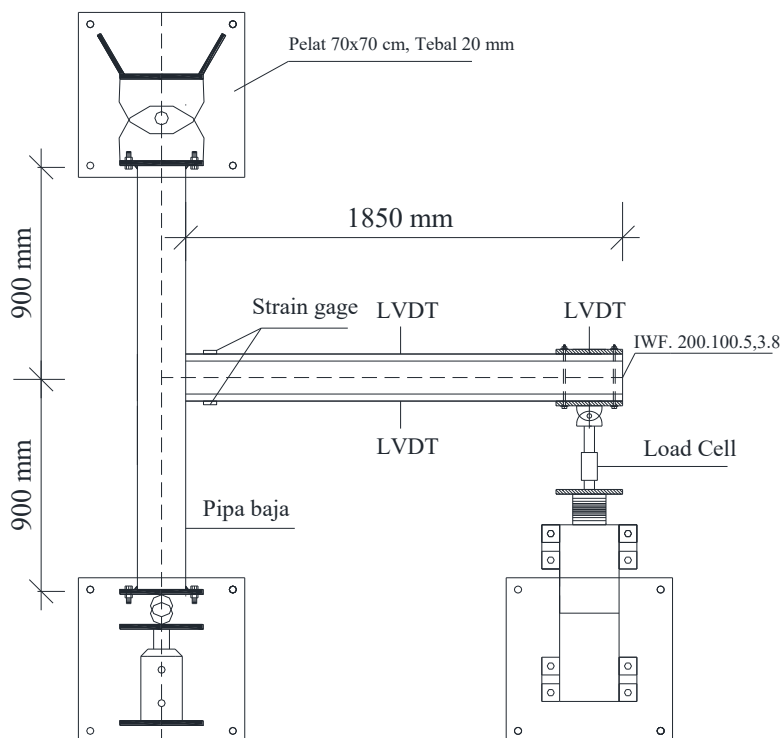
2.5 Pemasangan *Strain Gauge*

Strain gauge dipasang setelah pembuatan benda uji, dan digunakan untuk mengetahui regangan yang terjadi pada sambungan pelat diafragma melingkar sisi kanan dan kiri serta pada kolom bagian bawah dan atas. Nilai regangan yang terjadi dibaca pada DAQ *LabJack*

2.6 Pengujian Sambungan Balok-Kolom

Pengujian benda uji dilakukan di Laboratorium *Mechanics of Material* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada. Pengujian dilakukan setelah beton pengisi pada kolom tabung baja

mencapai umur 28 hari. Pada kedua ujung kolomnya diberi tumpuan sendi-rol. Sedangkan pada balok bagian atas dibiarkan bebas untuk dilakukan pembebanan bolak-balik atau siklik. Pembebanan bolak-balik dilakukan dengan *displacement controlled* seperti yang disyaratkan dalam ACI TI. 1-01. *Sett up* pengujian dapat dilihat pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. *Sett up* pengujian tampak atas

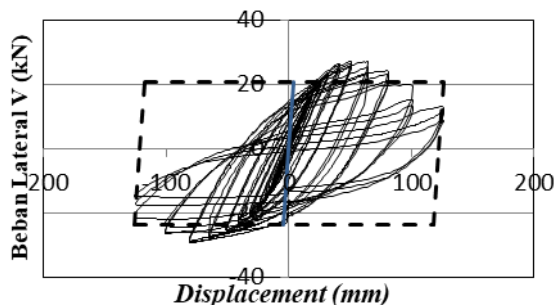
2.7 Tahapan Pengumpulan dan Pengolahan Data

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. 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.

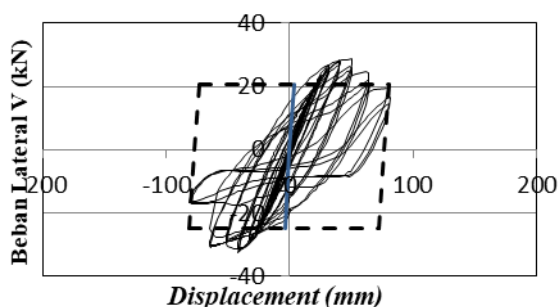
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Benda uji BKD-T dan BKD-K tidak memenuhi kaidah sambungan kolom-balok yang dapat dipakai di sistem struktur baja dan beton komposit tahan gempa pemikul momen khusus. Karena berdasarkan hasil pengujian,

benda uji BKD-T dan BKD-K belum memenuhi sambungan yang mempunyai kemampuan daktilitas yang cukup. Hubungan antara beban dan *displacement* dari hasil pengujian dapat dilihat pada kurva *histeretic loops* Gambar 6, dan Gambar 7.



Gambar 6. *Hysteretic loop* join benda uji BKD-T



Gambar 7. *Hysteretic loop* join benda uji BKD-K

Perbandingan besarnya beban lateral dan *displacement* lateral untuk kondisi *crack*, *yield*, *ultimite* dan *failure* disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Beban dan defleksi *crack*, *yield*, *peak* dan *failure*

No	Benda uji	Crack		Yield		Peak		Failure		Daktilitas
		P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ	
		(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(μ)
1	BKD-T	10,98	12,26	26,08	28,84	27,45	65,96	21,96	102,41	3,55
2	BKD-K	11,84	10,98	24,48	22,73	29,61	46,51	23,68	72,43	3,19

Dari kurva pada Gambar 6, dan Gambar 7 yang diperoleh, dan berdasarkan kriteria penerimaan seperti yang telah ditetapkan oleh ACI T1.1-01 didapatkan hasil sebagai berikut :

- Benda uji BKD-T dan benda uji BKD-K harus mencapai tahanan lateral minimum $E_n = 31,84$ kN sebelum *drift ratio* 2%. Beban lateral untuk benda uji sebelum 2%, untuk benda uji BKD-T sebesar 22,72 kN, benda uji BKD-K sebesar 28,87 kN.
- Tahanan lateral maksimum E_{max} yang tercatat pada pengujian tidak boleh melebihi nilai λE_n ($1,25 \times 31,84 = 39,8$ kN) untuk benda uji BKD-T dan BKD-K. Untuk benda uji BKD-T sebesar 28,61 kN, dan benda uji BKD-K rata-rata diperoleh E_{max} sebesar 31,98 kN. Benda uji BKD-T dan BKD-K memiliki

nilai gaya lateral yang lebih kecil dari gaya lateral yang direncanakan. (λ adalah faktor kuat lebih kolom yang digunakan pada modul uji, $\lambda = 1,25$).

- c. Drift maksimum yang harus dicapai sebagai acuan untuk hasil penerimaan hasil tes, dimana nilainya tidak boleh kurang dari 0,035, karakteristik siklus penuh ketiga pada level *drift* tersebut harus memenuhi hal-hal sebagai berikut :

- Gaya puncak pada arah beban yang diberikan tidak boleh kurang daripada $0,75 E_{max}$ pada arah beban yang sama. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. $0,75 E_{max}$

	Siklus ke tiga (+)	Siklus ke tiga (-)	$0,75 E_{max}$ (+)	$0,75 E_{max}$ (-)
BKD-T	23,77	-27,87	20,11	-21,42
BKD-K	20,56	-24,82	20,59	-24,33

- Disipasi energi relatif tidak boleh kurang daripada $1/8$. Disipasi relatif (β) merupakan *ratio* perbandingan antara luasan *hysteretic loops* (A_h) putaran ketiga (*drift ratio* tidak kurang dari $0,75 E_{max}$) dengan luasan $(E_1+E_2)(\theta_1'+\theta_2')$ yang ditandai dengan garis putus-putus pada Gambar 6, dan Gambar 7. Disipasi energi relatif pada masing-masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Disipasi energi relatif

No	Benda Uji	Drift (%)	Ah	E1	E2	θ_1'	θ_2'	B
			(kN.mm)	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	
1	BKD-T	5,46	2509,76	20,56	23,82	121,93	121,58	0,23
2	BKD-K	3,50	2506,14	20,56	24,83	76,20	77,22	0,36

- Kekakuan sekan garis yang menghubungkan titik *ratio drift* $-0,0035$ ke *ratio drift* $0,0035$ harus tidak kurang dari 0,05 kali kekakuan awal. Kekakuan masing-masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai kekakuan

No	Benda Uji	Kekakuan	$0,05$ Kekakuan Awal
		(-0,35%-0,35%) (kN/mm)	(kN/mm)
1	BKD-T	0,895	0,050
2	BKD-K	1,042	0,052

Berdasarkan analisis hasil kriteria penerimaan di atas, benda uji BKD-T dan BKD-K tidak memenuhi salah satu persyaratan di atas, yaitu persyaratan pada kriteria penerimaan a di atas. Tetapi memenuhi persyaratan b dan c pada drift ratio di atas 3,5%. Sehingga benda uji BKD-T dan BKD-K dapat digunakan pada sistem struktur rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa dengan kategori disain seismik B dan C yang nilai R (faktor modifikasi respon) maksimum dapat diambil 3, dan 3,5. Kriteria kehandalan sistem struktur dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan nilai kekakuan

	BKD-T	BKD-K
Kekakuan elastik	0,92	1,077
Hysteretic Energy	2345,80 kN.mm	1483,83 kN.mm
Potential energy	2492,43 kN.mm	1599,02 kN.mm
EVDR	3,16%-31,58%	1,63%-22,54%
Pola Keruntuhan	<i>fatigue failure</i>	<i>fatigue failure</i>

Benda uji BKD-T mengalami keruntuhan yang terjadi pada penurunan beban tarik sebesar 60,34% dari beban puncak pada *drift ratio* ke-13 (5,46%), dan penurunan beban tekan sebesar 62% dari beban puncak pada *drift ratio* ke-14 (6,79%). Adapun benda uji BKD-K mengalami keruntuhan yang terjadi pada penurunan beban sebesar 80% dari beban lateral puncak pada *drift ratio* ke-12 (4,36%). Pola keruntuhan yang terjadi pada benda uji BKD-T dan BKD-K adalah tipe keruntuhan lelah (*fatigue failure*), dimana retakan akan makin bertambah panjang untuk tiap siklus pembebanan sehingga akan mengurangi kapasitas elemen sambungan untuk memikul beban. Pola keruntuhan dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 8. Keruntuhan pada saat penurunan beban puncak BKD-T sisi bawah



Gambar 9. Keruntuhan pada saat penurunan beban puncak BKD-T sisi atas



Gambar 10. Keruntuhan pada saat penurunan beban puncak BKD-K sisi bawah



Gambar 11 Keruntuhan pada saat penurunan beban puncak BKD-K sisi atas

4 KESIMPULAN

Dari hubungan beban dan *displacement*, kapasitas beban lateral rata-rata untuk benda uji BKD-T sebesar 27,32 kN pada *displacement* 65,98 mm (*drift ratio* 3,57%), dan benda uji BKD-K sebesar 29,66 kN yang dicapai pada *displacement* 40,97 mm (*drift ratio* 2,2%). Dari nilai di atas terlihat bahwa kapasitas beban lateral benda uji BKD-K lebih besar dari kapasitas beban lateral benda uji BKD-T. Pola keruntuhan yang terjadi pada benda uji BKD-T dan BKD-K adalah tipe keruntuhan lelah (*fatigue failure*), dimana retakan akan semakin bertambah panjang untuk tiap siklus pembebanan sehingga mengurangi kapasitas elemen sambungan untuk memikul beban. Berdasarkan kriteria penerimaan ACI T1.1-01, benda uji BKD-T dapat digunakan pada sistem struktur rangka baja pemikul momen biasa dengan kategori disain seismik B dan C yang nilai R (faktor modifikasi respon) maksimum diambil 3,5. Sedangkan benda uji BKD-K dapat digunakan pada sistem struktur rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa dengan kategori disain seismik B yang nilai R (faktor modifikasi respon) maksimum diambil 3.

5 UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dukungan pendanaan dalam penelitian ini. Semoga kerjasama ini membawa manfaat bagi bangsa dan negara untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan aplikasinya di masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ACI 374. 1-05. (2005). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing*.
- [2] ACI T1.1-01. (2001). *Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames based on Structural Testing*. American Concrete Institute. Innovation Task Group 1 and Collaborators.
- [3] Alostaz, Y., & Schneider, S. P. (1996). *Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes*. Journal of Constructional Steel Research, 40(2), 95-127. [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(96\)00047-8](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(96)00047-8).
- [4] Badan Standarisasi Nasional. (2019). *Tata Cara Perencanaan ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta : SNI 1726-2019.
- [5] Kanatani, H., Tabuchi, M., Kamba, T., Hsiaolien, J. and Ishikawa, M., (1987). *A study on concrete filled RHS columns to H-beam connections fabricated with HT bolts in rigid frames*. ASCE Proceedings Composite Construction of Steel and Concrete, pp. 614-635.
- [6] Prion, H. G. L., & McLellan, A. B. (1992). *Connecting Steel Beams to Concrete-Filled Steel Columns*. Proceedings of the ASCE Structures Congress on Composite Compression Members, pp. 918-921.
- [7] Schneider, S. P., & Alostaz, Y. M. (1998). *Experimental Behavior of Connections to Concrete-filled Steel Tubes*. Journal of Constructional Steel Research, 45(3), 321-352. [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(97\)00071-0](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(97)00071-0).
- [8] Valbert, G., Essais d'. (1968). *assemblages soudés d'une solive sur un poteau en tube rempli de beton*. Construction Metallique, 4 Dec., 27-38 (in French).