

## Analisis Sambungan Antara Balok Iwf dengan Kolom Baja Akibat Beban Siklik

(Analysis of Connections Between Iwf Beams With Steel Columns Due To Cyclic Load)

EKO RIYANTO

### ABSTRAK

Penggunaan tabung baja dengan isian beton dapat meningkatkan kekuatan gaya aksial pada kolom. Selain itu, tabung baja berfungsi juga sebagai bekisting untuk inti beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku histeristis, kekuatan, kekakuan serta pola keruntuhan pada sambungan dalam menahan beban siklik. Dalam penelitian ini, dibuat dua buah benda uji yaitu benda uji sambungan menerus balok-kolom tabung baja dengan isian beton dan benda uji sambungan menerus balok-kolom tabung baja tanpa adanya isian beton. Sambungan sayap pada profil IWF yang menghubungkan kolom dan balok dibuat menembus kolom tabung baja dan dilas pada permukaan kolom. Benda uji dibebani dengan siklus beban yang mengacu pada ACI 374.1-05. Hasil pengujian menunjukkan benda uji dengan sambungan balok-kolom tabung baja isian beton memiliki histeresis lebih besar dari kolom tabung baja tanpa isian beton. Benda uji memiliki kegagalan tipe daktilitas parsial jika sebagai kriteria untuk memenuhi strong column weak beam.

**Kata kunci :** Sambungan balok-kolom, CFST, uji siklik

### ABSTRACT

*The use of steel tube columns has several advantages including: steel tubes also function as formwork for concrete cores, with the presence of concrete fillers in steel tubes, the compressive strength of steel tubes against axial forces will also increase. In addition the steel tube serves to prevent cracks in the concrete, and the composite column greatly increases stiffness and significant strength compared to the construction of steel frames and ordinary reinforced concrete. The connection between beams and steel tube columns must have sufficient strength to withstand earthquake loads. This study aims to determine the ability of beam joints with columns and to know the strength, as well as the pattern of joint collapse in resisting cyclic loads. In this study, a continuous steel beam column column test specimen was made with concrete fillings and continuous test specimens of steel tube columns without concrete filling. The wing joint on the IWF profile that connects columns and beams is made through steel tube columns and welded to the column surface. The test object is loaded with the load cycle referred to in ACI 374.1-05. The test results showed that the steel tube column-beam joint test object with concrete filling had a hysteresis loops larger than steel tube columns without concrete filling. The test object has a partial ductility type failure as a criterion of strong column weak beam.*

**Keywords:** beam-column join, CFST, cyclic test

### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi terus mengalami kemajuan sesuai dengan tuntutan dan perubahan jaman. Hal ini dapat dibuktikan dengan kemajuan ilmu dan teknologi dalam bidang perencanaan dan pelaksanaan konstruksi

bangunan khususnya struktur baja, kemajuan teknologi konstruksi struktur komposit baja dengan beton telah banyak digunakan untuk konstruksi bangunan gedung, jembatan, dan berbagai macam konstruksi lainnya. Kebanyakan sistem struktur komposit ini menggabungkan kelebihan dari kekuatan material baja dengan kekakuan komponen

beton sehingga memperoleh kekakuan dan kekuatan yang maksimal. Penggunaan struktur kolom komposit tabung baja dengan isian beton dalam mendukung beban lateral pada struktur rangka bangunan belum lazim dalam perkembangan konstruksi saat ini selain harus memenuhi kekuatan dan kekakuan. Ada dua jenis kolom komposit antara lain: bagian struktur baja terbungkus oleh beton dan tabung baja terisi beton penuh (*Concrete-Filled Steel Tube, CFST*).

Kombinasi antara tabung baja yang diisi beton ini juga mempunyai keistimewaan dalam hal tekuk lokal (*local buckling*) dapat dicegah, karena adanya inti beton di dalam tabung sehingga kestabilan struktur dapat dijaga Choi dkk. (1994). Pemakaian struktur kolom tubular komposit ini akan lebih praktis dan ekonomis jika tanpa adanya penyambung geser (*shear connector*) mekanik diantara inti beton dan tabung baja, juga tidak ada lagi tambahan tulangan pada inti beton kecuali tabung baja Johansson dan Gylltoft (2001).

Wang dkk (2009) mengamati perilaku sambungan *flush end plate* pada *CFST*, mendapatkan sambungan mempunyai kekuatan dan kekakuan sesuai yang disyaratkan dalam spesifikasi *EC3*. Sambungan baut yang digunakan menunjukkan solusi yang efektif untuk struktur rangka komposit penahan momen. Sedangkan dalam penelitian Wang dkk (2009) digunakan tabung baja tampang lingkaran dan balok profil-I dengan sambungan pelat sayap menerus, yang diuji sampai runtuh dengan beban siklik berdasarkan ketentuan standard *ATC-24*.

Beton normal dipakai untuk struktur beton bertulang, bagian-bagian struktur penahan beban, misalnya kolom, balok, dinding yang menahan beban, dan sebagainya. Kuat tekan beton normal berkisar antara 15 MPa – 30 MPa. Khusus untuk struktur beton yang berada di daerah gempa, kuat tekannya minimum 20 MPa Tjokrodimulyo (2007).

Menurut Moestopo (2012) prinsip dari perencanaan bangunan tahan gempa adalah untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur dan kehilangan korban jiwa, dengan tiga kriteria standar sebagai berikut : Pada saat gempa kecil tidak diijinkan terjadi kerusakan sama sekali.. Pada saat gempa sedang diijinkan terjadi kerusakan ringan tanpa kerusakan structural, Pada saat gempa besar

dijijinkan terjadi kerusakan struktural tanpa keruntuhan.

Struktur kolom dengan model tabung baja dengan isian beton (*CFST*) memberikan banyak manfaat secara struktural sebagai kolom komposit, di antaranya memiliki nilai kekuatan yang tinggi dan mencegah terjadinya tekuk lokal (*local buckling*), karena dengan adanya isian beton di dalam tabung menyebabkan kestabilan struktur dapat terjaga. Selama pekerjaan pengisian beton berlangsung tidak menggunakan bekisting (*formwork*), sehingga biaya konstruksi dan waktu akan lebih efisien. Berbagai jenis kolom potongan melintang kolom tabung baja dengan isian beton Qin. dkk (2014).

Alat sambung untuk *erection* di lapangan adalah baut, dipilih karena mudah dilaksanakan tanpa inspeksi yang rumit, cukup secara visual semata. Sambungan las lapangan harus dihindari, khususnya struktur utama. Bila terpaksa, itu harus dilakukan oleh tukang yang ahli dan dibawah kontrol mutu yang ketat. Sistem paku keling sudah usang, fungsinya telah digantikan oleh baut mutu tinggi Dewobroto (2015).

Penelitian mengenai perilaku sambungan balok baja dan kolom tabung baja dengan isian beton telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Alostaz dan Schneider (1998) membuat beberapa bentuk sambungan skala besar yang diuji dengan menggunakan pedoman *ATC-24* untuk pengujian siklik komponen baja. Pembebanan siklik diberikan pada ujung balok. 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. Dari hasil pengujian dapat dinyatakan 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 diafragma berukuran minimum berdasarkan penelitian tersebut dapat digunakan di daerah resiko gempa rendah.

Struktur kolom baja komposit yang terdiri atas tabung baja dengan isian beton (CFST) sangat efisien dan praktis dibandingkan kolom baja atau beton bertulang biasa (Han, dkk, 2014), 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 di lapangan menjadi sesuatu yang sangat penting untuk direncanakan dengan sebaik-baiknya oleh perencana.

Felny (2015) pernah melakukan penelitian tentang dua buah benda uji yaitu benda uji sambungan balok- kolom tabung baja dengan isian beton dengan menggunakan pelat diafragma menerus (BKDM-K) dan tanpa isian beton (BKDM-T) sebagai pembanding. Bentuk sambungan antara kolom tabung baja dan balok baja IWF dibuat dengan tambahan plat diafragma yang menyambung antara sayap pelat IWF dan kolom. Benda uji diberi beban pada posisi pembebanan diujung balok yang mensimulasikan gaya gempa berdasarkan kriteria penerimaan yang diatur dalam ACI T1.1-01 dan SNI 7834-2012.

Haykal (2015) melakukan penelitian eksperimental dengan membuat 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 diberi beban pada ujung balok yang mensimulasikan gaya gempa berdasarkan kriteria penerimaan yang ditentukan dalam

Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Metode Uji Dan Kriteria Penerimaan Sistem Struktur Rangka Memikul Momen Beton Bertulang Pracetak Untuk Bangunan Gedung*.

Qin, dkk, (2014) melakukan penelitian dengan judul “*Seismic Behavior of Through-Diaphragm Connections Between CFRT Columns and Steel Beams-Experimental Study*”. Dalam penelitian ini, dilakukan uji eksperimental sambungan balok-kolom tabung persegi empat yang diisi beton (CFRT-Concrete-Filled Rectangular Steel Tubular). Pengujian dilakukan dengan mengikuti pedoman *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui dan membandingkan perilaku histerisis sambungan sayap menerus balok profil Iwf dengan kolom tabung baja tanpa maupun dengan isian beton akibat beban siklik, mengukur kekuatan, kekakuan serta pola keruntuhan sambungan sayap menerus pada balok profil Iwf dengan kolom tabung baja, akibat beban siklik, membandingkan antara hasil perhitungan analisis dan pengujian sambungan balok profil Iwf dengan kolom tabung baja.

## METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini jenis sambungan dibagi menjadi dua kategori, yaitu: sambungan dengan sayap menerus pada balok baja profil Iwf dan kolom tabung baja tanpa isian beton serta sambungan sayap menerus pada balok baja profil Iwf dan kolom tabung baja dengan isian beton. Sambungan pada permukaan tabung baja meliputi: pengelasan sambungan pada badan dan sayap menerus balok profil Iwf yang menembus kolom sampai ke permukaan sebagai penghubung antara balok profil Iwf dengan kolom tabung baja tersebut. Adapun sambungan balok profil Iwf dan kolom tabung baja dengan isian maupun tanpa isian beton menggunakan baut. Adapun bagan alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Penelitian mengacu pada ketentuan pembebanan yang ada di dalam ACI 374.1-05. *Drift rasio* yang dimaksudkan adalah perbandingan simpangan yang terjadi terhadap panjang balok pada benda uji. Adapun ketentuannya adalah sebagai berikut :

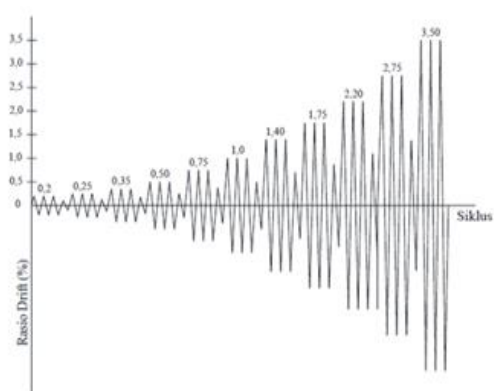
1. Benda uji harus dibebani oleh rangkain urutan siklus kontrol perpindahan yang mewakili *drift* yang diharapkan terjadi pada sambungan disaat gempa.
2. Tiga siklus penuh harus diaplikasikan pada setiap *drift rasio* (Gambar 2)
3. *Drift rasio* awal harus berada dalam rentang perilaku elastik linier benda uji. *Drift rasio* berikutnya harus bernilai tidak kurang dari pada 1,25 kali, dan tidak lebih dari pada 1,5 kali *Drift rasio* sebelumnya (Gambar 2)
4. Pengujian harus dilakukan dengan meningkatkan *drift rasio* secara bertahap hingga tercapai nilai *drift rasio* minimum 0,035.

Data diperlukan untuk menginterpretasikan kinerja benda uji secara kualitatif harus direkam. Dokumen foto yang memperlihatkan kondisi benda uji disetiap akhir siklus pembebanan harus diambil Nurjaman (2010).

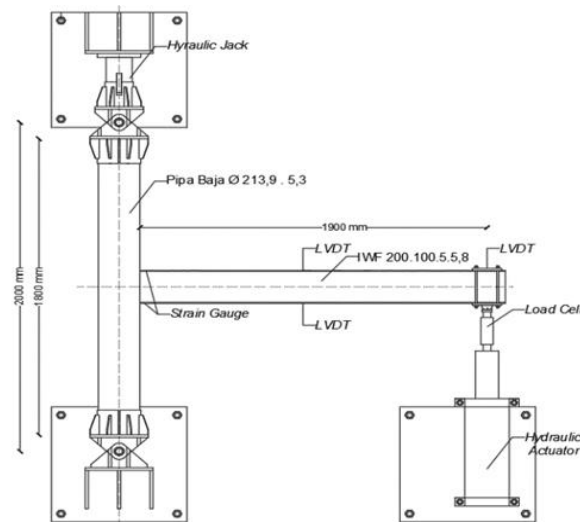
Perancangan skala dan dimensi benda uji pada penelitian ini didasarkan pada kapasitas peralatan Laboratorium *Mechanics of Material* Pusat Studi Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada. Perhitungan dan analisis gaya dalam dilakukan dengan menggunakan metode LRFD.



GAMBAR 1. Bagan alir penelitian



GAMBAR 2. Siklus pembebanan dengan control perpindahan (ACI T1 374.1-05)



GAMBAR 3. Set-up pengujian

Pengujian benda uji dilakukan di Laboratorium *Mechanics of Material*, Pusat Studi Ilmu Teknik, Pusat Antar Universitas, Universitas Gadjah Mada. Pengujian dilakukan setelah beton pengisi pada kolom tabung baja 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 3.

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 isian beton akan dibandingkan dengan kondisi tabung baja kosong.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Hasil pengujian bahan*

Dari hasil pengujian tarik profil pipa baja diambil  $f_y = 341,55$  MPa dan  $f_u = 409,99$  MPa, pelat baja diambil  $f_y = 348,73$  MPa dan  $f_u = 464,23$  MPa, Iwf badan diambil  $f_y =$

$335,76$  MPa dan  $f_u = 453,60$  MPa, serta Iwf sayap diambil  $f_y = 282,29$  MPa dan  $f_u = 432,95$  MPa. Hasil pengujian tarik baut baja UNS 4.6 diambil  $f_y = 400,18$  MPa dan  $f_u = 571,68$  MPa. Adapun Komposisi campuran yang digunakan sebagai beton pengisi kolom tabung pipa baja dalam pembuatan benda uji adalah beton cor ditempat dengan mutu beton  $f'_c = 25,41$  MPa.

### *Hasil pengujian sambungan*

#### 1. Mekanisme *Strong Column Weak Beam*

Kapasitas desain dalam SRPMK “kolom kuat balok lemah” digunakan untuk memastikan tidak terjadinya sendi plastis pada kolom selama gempa terjadi. Dalam penelitian ini benda uji BKS-K mengalami leleh pada nomor siklus pembebanan ke 6 (enam) atau *drift rasio* 1 % yaitu pada beban rata-rata sebesar 12,23 kN dan beban tarik sebesar 16,89 kN, sedangkan pada benda uji BKS-T mengalami leleh pertama pada nomor siklus pembebanan yang sama dengan nilai beban rata-rata sebesar 14,96 kN dan beban tarik sebesar 17,46 kN, sedangkan kolom baja baik dengan isian beton maupun tanpa isian beton secara pengamatan visual tidak mengalami keruntuhan. Parameter kedua yaitu dapat terlihat dan ditinjau dari pola kerusakan dan keruntuhan yang terjadi pada benda uji.

#### 2. Daktilitas

Menurut Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, daktilitas merupakan

kemampuan struktur gedung untuk mengalami simpangan pasca – elastik yang secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa di atas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur gedung tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam diambang keruntuhan.

Faktor daktilitas adalah perbandingan antara defleksi ultimit dengan defleksi *yield*. Hasil analisis dari masing-masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Dari Tabel 1 tersebut menunjukkan bahwa faktor daktilitas benda uji BKS-K sedikit lebih besar dibandingkan benda uji BKS-T yaitu selisih 0,69. Hal ini terjadi karena penurunan beban puncak pada benda uji BKS-K dan BKS-T terjadi pada saat *drift ratio* yang sedikit berbeda. Dengan mengacu pada peraturan syarat SRPMK untuk daktilitas adalah daktilitas penuh, sedangkan daktilitas pada benda uji yang telah dilakukan adalah daktilitas parsial.

### 3. Hubungan beban dan *displacement*

#### a. Observed hysteretic curve

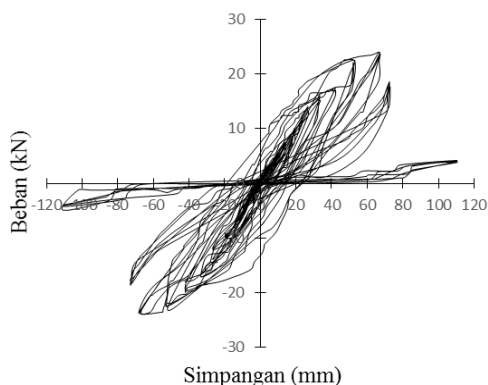
Hubungan antara beban dan simpangan dari hasil pengujian dapat dilihat pada kurva *hysteretic loops* Gambar 4, dan Gambar 5. Benda uji BKS-K mengalami peningkatan beban seiring dengan pertambahan simpangan. Beban puncak pada benda uji BKS-K terjadi

pada simpangan 67,04 mm yaitu sebesar 23,82 kN pada siklus pertama *drift ratio* 3,5 % dan mengalami penurunan pada *drift ratio* 4,75 % yang sama pada siklus ketiga sebesar 13,31 % dari beban puncak yaitu menjadi 18,57 kN pada simpangan 72,51 mm, dan seiring bertambahnya beban terjadi penurunan yang besar dari beban puncak yaitu pada *drift ratio* 3,5% dimulai dari beban puncak yaitu sebesar 22,50%. Benda uji BKS-T mengalami beban puncak pada *displacement* 52,64 mm dan penurunan 80% dari beban puncak pada simpangan 60,20 mm. Adapun pada benda uji BKS-T sesuai yang ada pada Gambar 5 beban puncak terjadi pada *drift ratio* 2,75 % siklus pertama dengan simpangan 52,59 mm yaitu sebesar 26,15 kN.

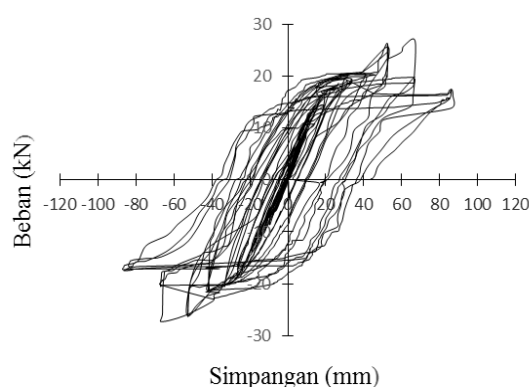
Selanjutnya dari Gambar 5 terlihat *hysteretic curve* BKS-T setelah *drift ratio* 2,75% terus mengalami penurunan beban yang dikarenakan oleh adanya kondisi *fatigue* akibat beban siklik yang bekerja. Beban siklik mengakibatkan adanya *strain hardening* pada sambungan las dan menyebabkan sambungan menjadi *brittle*. Selain itu pada Gambar 4, dan Gambar 5 terlihat benda uji BKS-T memiliki *hysteretic loops* yang lebih besar bila dibandingkan dengan benda uji BKS-K, hal ini dikarenakan adanya pengisi beton pada kolom BKS-T yang mengakibatkan peningkatan kekakuan pada kolom tabung baja. Sehingga disipasi energi yang dimiliki oleh benda uji BKS-T lebih besar dari benda uji BKS-K.

TABEL 1. Hasil analisis daktilitas

No	Benda Uji	Defleksi ultimit $\Delta_u$ (mm)	Defleksi Yield $\Delta_y$ (mm)	Faktor Daktilitas ( $\mu$ ) = $\Delta_u/\Delta_y$
1	BKS-K	62,97	19,12	3,29
2	BKS-T	75,92	29,17	2,60



GAMBAR 4. Observed hysteretic curve BKS-K



GAMBAR 5. Observed hysteretic curve BKS-T

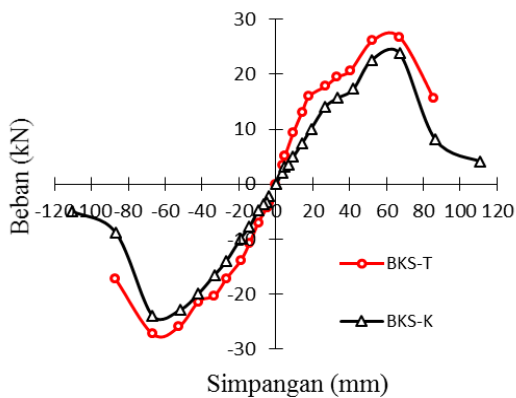
b. Kurva envelope

Kurva hasil perbandingan beban dan displacement dari hasil pengujian yang dilakukan pada join BKS-K dan BKS-T dapat dilihat pada Gambar 6. dan Gambar 7. Hasil tersebut menunjukkan bahwa benda uji BKS-K mengalami pencapaian beban lateral maksimum tekan dan tarik serta penurunan beban tekan dan tarik pada level drift ratio yang berbeda, bila dibandingkan benda uji BKS-T. Hal ini terjadi dikarenakan benda uji BKS-T mengalami retakan awal pada pelat sayap sambung menerus serta retakan makin bertambah panjang pada tiap siklus pembebanan secara berurutan. Berbeda dengan benda uji BKS-K yang mengalami retakan awal pada pelat sambung sayap menerus serta retakan makin bertambah panjang pada rangkaian siklus pembebanan yang bersifat tidak secara berurutan. Masalah ini terjadi akibat tidak adanya inti beton di dalam kolom pipa baja tersebut.

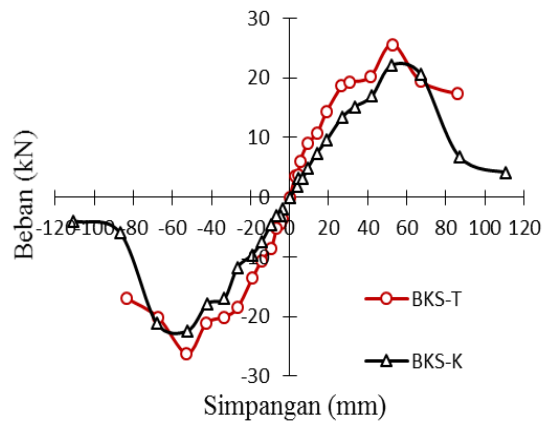
Sehingga mudah menimbulkan pelemahan pada permukaan dinding kolom pipa baja saat sambungan sayap menerus mengalami deformasi yang cukup besar dan masih mampu bertahan tanpa menimbulkan retakan yang makin bertambah panjang dalam beberapa rangkaian siklus pembebanan siklik. Dari hasil tersebut terlihat bahwa benda uji BKS-K sedikit lebih daktail bila dibandingkan dengan benda uji BKS-T.

c. Equivalent energy elastic plastic curve (EEEEPC)

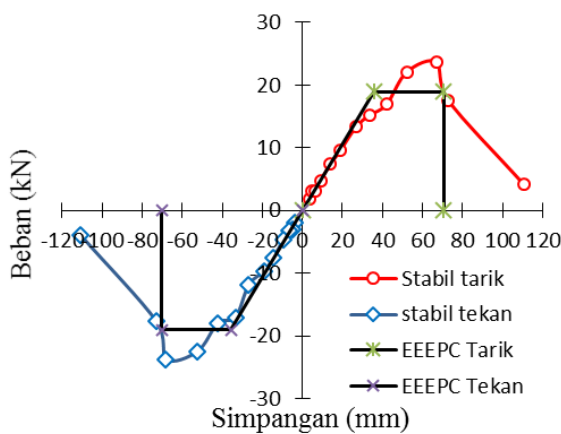
Stabilized Envelope curve benda uji BKS-K dan BKS-T selanjutnya dilakukan analisis untuk memperoleh Equivalent Energy Elastic-Plastic Curve (EEEEPC), yaitu hubungan antara beban dan simpangan pada saat kondisi crack awal, yield, peak, dan failure sebagai dasar perhitungan beban leleh, simpangan leleh, daktilitas dan kekakuan elastis. Hasil dari analisis dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



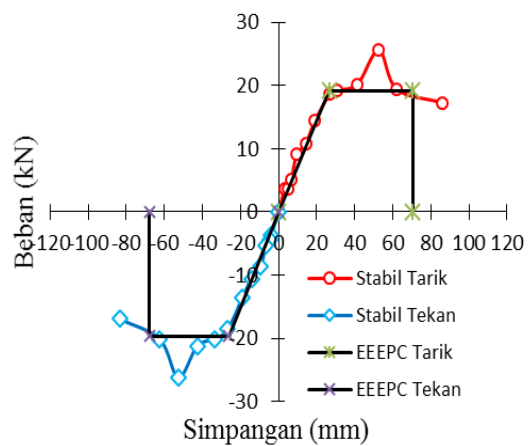
GAMBAR 6. Envelope Curve Saat Initial Condition



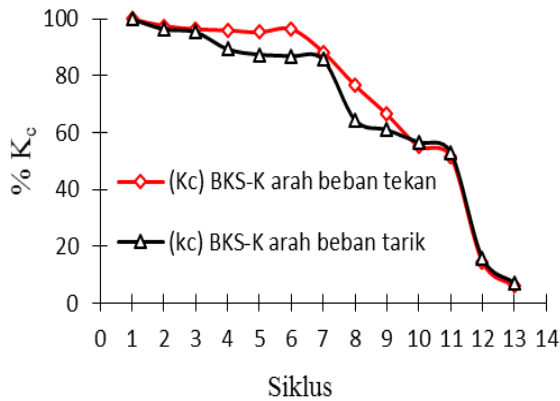
Gambar 7. Envelope Curve Saat Stabilized Condition



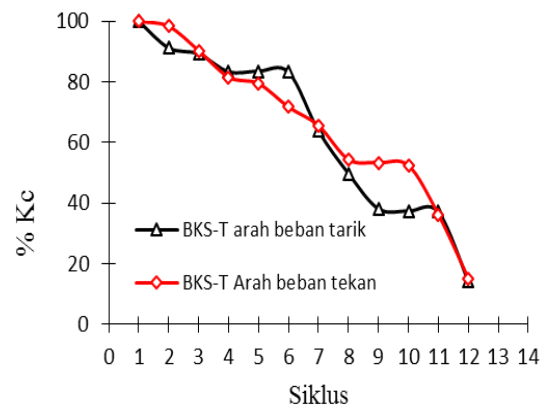
GAMBAR 8. Equivalent energy elastic-plastic curve (EEEEPC) pada benda uji BKS-K



GAMBAR 9. Equivalent energy elastic-plastic curve (EEEEPC) pada benda uji BKS-T



GAMBAR 10. Kekakuan siklus (Kc) BKS-K



GAMBAR 11. Kekakuan siklus (Kc) BKS-T

Benda uji BKS-T memiliki beban *crack* yang lebih besar dibandingkan benda uji BKS-K karena adanya isian beton di dalam kolom pipa baja yang meningkatkan kapasitas penampang kekuatan kolom benda uji BKS-T, sehingga beban *crack* awal yang terjadi pada sambungan dengan sayap menerus dan permukaan dinding kolom pipa baja akibat beban siklik pada ujung balok terjadi lebih besar dari pada benda uji BKS-K, dan kemudian secara berangsur-angsur terus dengan bertambahnya siklus pembebanan siklik tidak menimbulkan adanya pelelehan ataupun kerusakan pada permukaan dinding kolom pipa baja komposit tersebut.

#### d. Kekakuan siklus ( $K_c$ )

Kekakuan merupakan besarnya gaya yang mampu ditahan/diserap oleh struktur tiap satuan panjang. Kekakuan siklus pada pembebanan siklik secara umum akan mengalami penurunan pada setiap siklusnya,

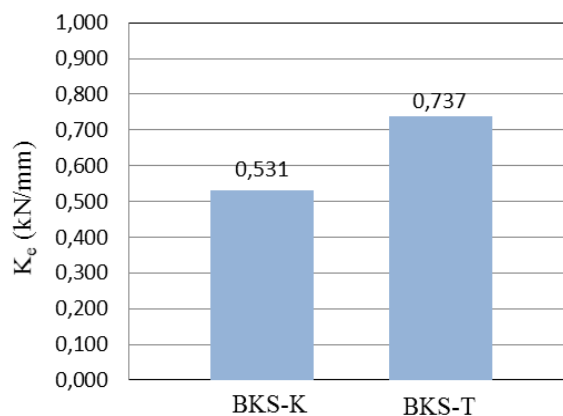
Hal ini disebabkan karena pembebanan bolak-balik yang dilakukan menyebabkan efek kelelahan/*fatigue* pada benda uji. Besarnya

kekakuan siklus dapat dinyatakan dengan presentase terhadap kekakuan awal siklus pada masing-masing benda uji. Pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Dari Gambar 10 dan 11, terlihat bahwa kekakuan benda uji BKS-K, dan benda uji BKS-T mengalami penurunan seiring dengan adanya penambahan siklus atau penambahan simpangan hingga sampai pada siklus terakhir atau benda uji runtuh. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya pelat sambung yang mengalami leleh dan retak pada sambungan las yang menyebabkan penurunan kekakuan pada benda uji.

#### e. Kekakuan elastis ( $K_e$ )

Kekakuan elastis adalah perbandingan antara beban *crack* dengan *displacement* pada saat *crack*. Analisis beban *crack* dan *displacement crack* diperoleh dari analisis *EEEEPC* pada Gambar 8, dan Gambar 9. Hasil perhitungan kekakuan elastis dapat ditunjukkan pada Gambar 12.



GAMBAR 12. Kekakuan elastis (Ke)



Dari Gambar 12 menunjukan bahwa kekakuan elastis benda uji BKS-T sedikit lebih besar dari benda uji BKS-K hal ini terjadi dikarenakan sambungan benda uji BKS-T lebih dahulu mengalami kondisi *crack* pada *displacement* yang relatif sedikit lebih rendah dibandingkan dengan benda uji BKS-K.

f. *Hysteretic energy (HE)*

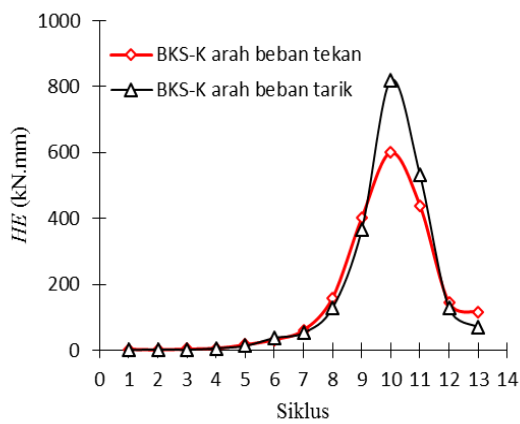
Adapun *hysteretic energy* menggambarkan kemampuan benda uji untuk mendisipasikan beban yang bekerja pada benda uji tersebut. Besarnya *hysteretic energy* dihitung berdasarkan besarnya luasan kurva yang dibentuk dari satu siklus lengkap (positif dan negatif). Besarnya *hysteretic energy* dihitung berdasarkan pendekatan numerik dengan cara menghitung luasan tiap pias pada siklus positif maupun negatif. Hasil rekapitulasi

perhitungan dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.

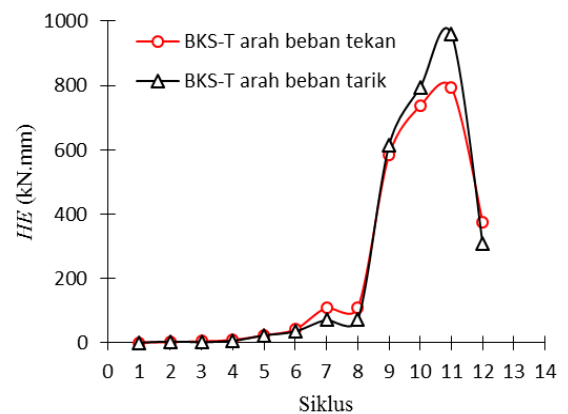
Dari Gambar 13 dan Gambar 14 terlihat bahwa benda uji BKS-K memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan benda uji BKS-T. Hal ini juga masih berkaitan dengan serapan energi yang dialami oleh benda uji terhadap beban luar yang bekerja untuk setiap siklusnya, terjadi pada pelat sambungan sayap menerus.

g. *Equivalent viscous damping ratio (EVDR)*

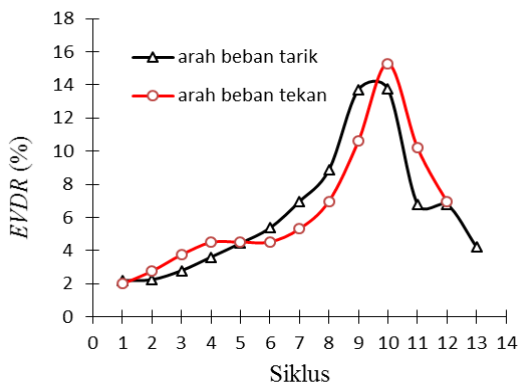
EVDR menggambarkan besarnya redaman struktur dalam menerima beban dari luar. Secara grafis besarnya nilai dari (*EVDR*) masing-masing benda uji dapat dilihat pada Gambar 15, dan Gambar 16.



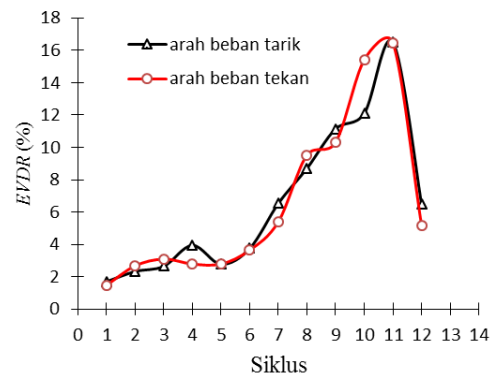
GAMBAR 13. Hysteretic Energy BKS-K



GAMBAR 14. Hysteretic Energy BKS-T



GAMBAR 15. EVDR benda uji BKS-K



GAMBAR 16. EVDR benda uji BKS-T

#### h. Kekuatan sambungan

Hasil pengujian pada benda uji BKS-K diperoleh beban maksimum sebesar 23,82 kN dan 23,88 kN untuk beban tarik dan beban tekan, sedangkan pada pengujian benda uji BKS-T diperoleh beban maksimum sebesar 26,15 kN dan 26,32 kN untuk beban tekan dan beban Tarik. Kekuatan balok baja profil I dengan analisis penampang plastis mencapai nilai  $M_p$  dengan  $P_u$  sebesar 27,94 kN. Penyambungan sayap menerus dengan sayap pada balok baja menggunakan las 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. Tetapi pada pengujian kegagalan terjadi pada sambungan las. Kegagalan yang terjadi pada las antara pelat sambung dengan pelat sayap balok profil Iwf menyebabkan keruntuhan secara tiba-tiba, ditandai dengan penurunan beban secara drastis pada hubungan beban dan simpangan yang masih memperlihatkan pola kenaikan. Selain memberikan modifikasi pada sambungan (*reduced beam section*) agar dapat memastikan kegagalannya pada daerah balok, sambungan las pada pelat sayap yang berperilaku getas dapat diganti dengan menggunakan sambungan pelat.

#### i. Pola keruntuhan

Pengamatan pola retak dimulai dari awal hingga akhir pengujian. Untuk benda uji BKS-K mengalami retak pertama pada kondisi tarik beban lateral puncak *drift ratio* ke-11 (3,5%) siklus pertama yaitu pada daerah kedua pelat sambungan sayap menerus sisi atas dan sisi bawah yang dapat dilihat pada Gambar 17.



GAMBAR 17. Retak Pertama Kali Benda Uji BKS-K

Retak awal ini terjadi hanya pada siklus pertama *drift ratio* ke-11 (3,5%). Keruntuhan yang dominan terjadi pada benda uji BKS-K adalah tipe keruntuhan lelah (*fatigue failure*). Akan tetapi pada *drift ratio* ke-6 (1,4%) terjadi *yield* pada sambungan pelat sayap menerus BKS-K. Hal ini terlihat dari hasil analisa pada saat pengujian, dimana sambungan pelat sayap menerus pada benda uji BKS-K mengalami *yield* pada *drift ratio* ke-7 (1,4%) tanpa adanya retak awal pada pelat sambungan sayap menerus. Selain itu keruntuhan benda uji BKS-K terjadi pada penurunan beban sebesar 17,54% dari beban puncak pada *drift ratio* ke-11 (3,5 %) siklus pertama. Kemudian pada *drift ratio* ke-11 (3,5%) siklus kedua terjadi penambahan retak pada bagian yang sama serta terjadi deformasi pada pelat sambung. Selanjutnya semakin bertambahnya nilai *displacement*, bentuk retak yang terjadi semakin bertambah besar pada daerah sambungan pelat sayap dan las antara pelat sayap sambung dengan sayap pada balok baja profil Iwf, sehingga menyebabkan keruntuhan pada kedua sisi sambungan balok baja profil I dengan kolom tabung pipa baja tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 18.

Dengan semakin bertambahnya simpangan, retak semakin bertambah besar pada sambungan las tumpul yang menghubungkan pelat sayap dari balok baja profil I dan pelat sambung sayap menerus. Dengan demikian, mekanisme keruntuhan benda uji BKS-K dan benda uji BKS-T tidak sesuai dengan mekanisme kapasitas desain dalam SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus).



GAMBAR 18. Keruntuhan Pada Benda Uji BKS-K

## KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, ditarik kesimpulan antara lain: Benda uji BKS-T memiliki *hysteristic loops* yang lebih jika dibandingkan benda uji BKS-K. Hal ini menunjukkan bahwa benda uji BKS-T memiliki redaman yang lebih baik dari pada benda uji BKS-K. Pada *hysteristic curve* benda uji BKS-K dan BKS-T mengalami penurunan beban pada pola yang masih memperlihatkan kenaikan. Hal ini disebabkan karena terjadinya kegagalan pada sambungan las antara pelat sayap sambung dengan sayap pada balok profil Iwf. Kegagalan pada las menyebabkan keruntuhan yang terjadi secara tiba-tiba. Kapasitas beban maksimal untuk benda uji BKS-K diperoleh pada siklus pertama penerapan *drift rasio* 3,5% sebesar 23,82 kN dan -23,88 kN pada *displacement* 67,04 mm dan 67,12 mm. Sedangkan benda uji BKS-T sebesar 26,15 kN dan -26,32 kN dan *displacement* 52,59 mm dan -62,64 mm yang diperoleh pada siklus pertama *drift rasio* 2,75%. Dari nilai tersebut terlihat bahwa dengan isian beton pada kolom meningkatkan kapasitas beban. Kekakuan elastis benda uji BKS-K sebesar 0,531 kN/mm, sedangkan pada benda uji BKS-T sebesar 0,737 kN/mm untuk beban tekan maupun tarik. Hal ini menunjukkan bahwa beton pengisi kolom dapat meningkatkan nilai dari kekakuan sambungan. Keruntuhan yang dominan terjadi pada benda uji BKS-K maupun BKS-T adalah tipe keruntuhan lelah (*fatigue failure*). Benda uji BKS-T memiliki *hysteretic energy* yang lebih besar dari benda uji BKS-K. Adanya pelat badan pada balok menyebabkan sayap lebih kuat dibandingkan dengan sambungan las. Hal ini dapat dilihat dari pola keruntuhan dimana retakan awal terjadi pada bagian sambungan las sejajar dengan pelat badan balok dan semakin melebar seiring dengan penambahan beban. Sambungan las pada sayap yang keagalannya bersifat getas dapat digantikan dengan tambahan sambungan menggunakan pelat. Selain itu sendi plastis pada balok dapat dipastikan dengan cara melakukan upaya modifikasi sambungan (*reduced beam section*) pada sayap ujung balok. Tanpa adanya kegagalan pada kolom maka sambungan memenuhi kriteria *Strong Column Weak Beam*.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI 374. 1-05. (2005). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing*.
- ACI T1.1-01. (2001). *Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames based on Struktural Testing*. American Concrete Institute. Innovation Task Group 1 and Collaborators
- Alostaz, Y. M. and Schneider, S. P., (1998). "Experimental Behavior of Connections to Concrete-Filled Steel Tubes". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 45, No. 3, pp. 321-352
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Metode Uji Dan Kriteria Penerimaan Sistem Struktur Rangka Memikul Momen Beton Bertulang Pracetak Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta : SNI 7834-2012.
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta : SNI 1726-2012
- Choi, S. M., Eom, C. H., kim, D. K. (1994), *A Study on the Load Capacities of Concrete-Filled Circular Steel Tube Columns with Confinement Effects*, Steel-Concrete Composite Structures, Additional Papers, Proceedings of the 4th ASCCS International Conference, Kosice, Slovakia, June, 14-19.
- Dewobroto, W., (2015). *Struktur Baja – Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010*, Lumina Press, Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan Lippo Karawaci, Tangerang.
- Felny, F., (2015). "Perilaku Sambungan Balok-Kolom Tabung Baja Dengan Isian Beton Menggunakan Pelat Diafragma Menerus Akibat Beban Siklik". *Thesis Program Pascasarjana Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

- Haykal, M. (2015). "Perilaku Sambungan Balok baja dan kolom tabung baja dengan isian beton menggunakan pelat diafragma melingkar Akibat Beban Siklik". *Thesis: Program Pascasarjana Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.*
- Johanson, M., 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, 393 - 410
- Moestopo, M., (2012), *Struktur Bangunan Baja Tahan Gempa*, Seminar dan Pameran HAKI, Jakarta.
- Nurjaman, H., N., (2010), *Standar Nasional Indonesia Tentang Metoda Uji Dan Kriteria Penerimaan Sistem Stuktur Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang Pracetak Untuk Bangunan Gedung*, Pusat Litbang Permukiman Kementerian Pekerjaan Umum (Puskim), Bandung.
- Tjokrodimulyo, K., (2007), *Teknologi Beton*, Biro Penerbit, Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wang, J. F., Han, L. H., Uy, B., (2009), *Behaviour of flush end plate joints to concrete- filled steel tubular columns*, Journal of Constructional Steel Research, 925-939, Elsevier.
- 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

---

PENULIS:

Eko Riyanto

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,  
Universitas Muhammadiyah Purworejo,  
Purworejo.

Email: eko.riyanto@umpwr.ac.id