

Pengekang *Crossties* di Zona Tekan Balok dengan Pembebanan Siklik

*Yulita Arni Priastiwi¹, Iswandi Imran², Nuroji¹, Arif Hidayat¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

^{*)}yulita_tiwi@gmail.com

Received: 17 Mei 2018 Revised: 7 November 2018 Accepted: 9 November 2018

Abstract

Crossties that was installed as a confinement in the compression zone of the beam is proven can increase the ductility, especially when receiving the earthquake load. Using an experimental study, this paper explains the effect of crossties which was installed in compression zone of the beam. The model was a simplification of the plastic hinge of the beam. The beam was enlarged in the center of the span and would be loaded with a cyclic of point load, so as to produced the largest moment and shear fields in the face beam of the column. Moreover, the loading was provided by the displacement control system to achieve the ultimate condition. The results show that the crossties significantly increases the displacement and curvature ductility of the beams of 58.7% and 78.2%, respectively, compared to the beam without confinement. In addition, the load cycle formed by cyclic loading increases to 43 cycles in beam with crossties, meanwhile the beam without confinement can only survive up to 33 cycles. The crossties could also increase the cumulative value of inelastic displacement that occurs up to 98%, whereas its energy dissipation value is six times than the beam without confinement. On the other hand, the maximum load and capacity moment only increase about 6.5%.

Keywords: *Crossties, confinement, ductility*

Abstrak

Bentuk kait (crossties) yang dipasang sebagai pengekang (confinement) di zona tekan penampang balok terbukti mampu meningkatkan daktilitas balok terutama saat menerima beban gempa. Paper ini menjelaskan pengaruh pemberian confinement berbentuk crossties yang dipasang di zona tekan penampang balok. Model spesimen yang diambil merupakan penyederhanaan daerah sendi plastis balok di muka kolom. Model balok diberi pembesaran di bagian tengah bentangnya dan dibebani dengan beban terpusat siklik, sehingga menghasilkan bidang momen dan geser terbesar di balok muka kolom. Pembebanan diberikan dengan sistem displacement control hingga tercapai kondisi ultimit. Hasil pengujian menunjukkan confinement berbentuk crossties signifikan meningkatkan daktilitas displacement maupun daktilitas kurvatur dari balok, masing-masing sebesar 58,7% dan 78,2% dibanding balok tanpa confinement. Siklus beban yang terbentuk akibat pembebanan siklik meningkat menjadi 43 siklus pada balok dengan crossties confinement, sedangkan balok tanpa confinement hanya mampu bertahan hingga 33 siklus saat kondisi ultimit. Adanya confinement crossties juga meningkatkan nilai kumulatif perpindahan inelastik yang terjadi pada spesimen hingga 98% dan nilai disipasi energinya enam kali lipat dibanding balok tanpa confinement di zona tekannya. Namun demikian untuk kapasitas beban serta momen maksimum hanya mengalami kenaikan berkisar 6,5%.

Kata kunci: *Kait, pengekang, daktilitas*

Pendahuluan

Pengekang (*confinement*) seringkali ditambahkan pada elemen struktur beton bertulang, terutama pada elemen struktur kolom, balok, maupun

daerah lain yang berpotensi terjadinya sendi plastis (Imran *et al.*, 2009). Adanya pengekangan yang diberikan pada beton akan menghambat pengembangan deformasi arah lateral dari elemen struktur terutama saat menerima beban aksial

(Jeffrey & Hadi, 2008). Pengekang pada beton juga dapat meningkatkan deformabilitas material beton secara signifikan sehingga mampu menghasilkan elemen struktur beton bertulang yang sangat daktilitas, khususnya di rentang pasca elastis (Bae & Bayrak, 2008).

Penelitian mengenai *confinement* pada balok hingga saat ini masih sangat terbatas dibandingkan penelitian pengekangan pada kolom. Beberapa bentuk pengekang pada balok, khususnya di zona tekan penampang balok yang telah dikembangkan oleh peneliti terdahulu diantaranya adalah bentuk spiral (Base, 1962; Base & Read, 1965; Leung & Burgoyne, 2005, Hadi & Schimdt, 2002, Whitehead & Ibell, 2004, Hadi & Elbasha, 2007, serta Tee *et al.*, 2017) serta bentuk persegi (Ziara *et al.*, 1995; Delalibera & Giongo, 2008; Priastiwati *et al.*, 2014, Priastiwati & Imran, 2015, Priastiwati *et al.*, 2017). Bentuk spiral dan persegi sebagai *confinement* yang telah diteliti sebelumnya menunjukkan adanya kontribusi positif dari *confinement* di zona tekan balok terutama dalam hal daktilitas, namun demikian kedua bentuk *confinement* tersebut rumit dalam fabrikasi dan pembuatan secara manual terutama untuk bentuk spiral.

Dalam tulisan ini disampaikan hasil penelitian mengenai pemberian pengekang berbentuk kait (*crosssties*) pada balok khususnya di zona tekan penampang balok di daerah sendi plastis. Penelitian dengan *crosssties* pernah juga dilakukan oleh Sakai & Sheikh (1989) dan juga Moehle & Cavanagh (1985) namun dilakukan pada kolom. Penelitian mengenai *confinement* di zona tekan penampang balok ini merupakan satu rangkaian dengan penelitian sebelumnya (Priastiwati *et al.*, 2017) dan (Priastiwati & Imran, 2015) yang memasang *confinement* berupa persegi (*hoops*) di daerah zona tekan penampang balok di daerah sendi plastis balok. Pemberian *confinement* di zona tekan penampang balok dimaksudkan untuk memperoleh daktilitas lebih tinggi terutama di daerah sendi plastis balok saat mengalami beban bolak-balik seperti beban gempa. Bentuk *crosssties* sendiri dipilih karena bentuk ini lebih mudah didesain dan difabrikasi, sehingga diharapkan akan mudah pula untuk diterapkan pemakaiannya secara umum.

Metode

Dalam penelitian ini yang menjadi fokus perhatian adalah daerah sendi plastis balok, yaitu daerah di muka kolom pertemuan balok-kolom. Model sederhana berupa balok dengan pembesaran di tengah bentangnya yang kemudian disebut sebagai *stub* dibuat. *Stub* dalam hal ini merupakan

representasi dari kolom. Dimensi balok berukuran 150 x 300 mm dengan panjang 4,0 m, sedangkan *stub* berukuran 250 x 400 x 400 mm. *Stub* dibuat lebih kaku dan kuat dibandingkan baloknya agar kerusakan tidak terjadi pada *stub* melainkan pada balok.

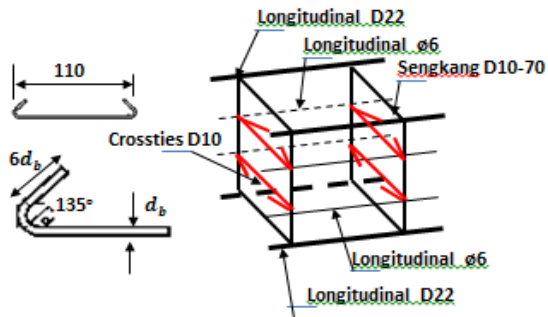
Pada balok dipasang tulangan longitudinal tarik maupun tekan utama berdiameter sama yaitu 2D22 dengan tegangan leleh tulangan, $f_y = 476 \text{ MPa}$. Diameter tulangan longitudinal dibuat sama atas dan bawah karena kedua sisi penampang balok akan berfungsi sebagai daerah tarik dan tekan secara bergantian akibat diberikan pembebanan bolak-balik (siklik).

Luas tulangan tarik maupun tekan sebesar 334,09 mm^2 dengan rasio penulangan (ρ) sebesar 1,72%. Selimut beton untuk balok diambil 20 mm. Balok diberi sengkang sebagai tulangan geser dengan baja ulir D10 ($f_y = 444 \text{ MPa}$) yang berjarak antar sengkang 70 mm. Sengkang paling ujung dipasang dari tepi *stub* sejauh 50 mm sesuai persyaratan penulangan lentur untuk struktur SRPMK (SNI 2847, 2013). Pada balok ditambahkan pula tulangan longitudinal polos $\phi 6$ mm yang digunakan untuk pemegang *crosssties* ke sengkang dengan ikatan kawat bendrat. Seluruh tulangan longitudinal dibuat menerus hingga ujung balok dan dibengkokkan 90° serta ditambahkan perpanjangan $12d_b$ pada ujung bebas batang tulangan.

Pengekang bentuk kait (*confinement crosssties*) sendiri terbuat dari baja tulangan ulir berdiameter 10 mm dengan lebar sama dengan lebar penampang balok dikurangi 2x tebal selimut betonnya dan di kedua ujungnya diberi kait gempa, yaitu kait dengan sudut 135° (SNI 1726, 2012) dan panjang $6d_b$ (d_b adalah diameter tulangan). Kait dipasang menempel pada sengkang dan diikat dengan kawat bendrat dan ditopang oleh tulangan longitudinal polos $\phi 6$ mm.

Pemasangan *crosssties* tepat di atas sumbu netral yaitu sejarak 110 dari tepi serat atas sehingga hanya tegangan tekan saja yang ada. Rasio tulangan lateral dari *crosssties* (ρ_{sc}) sebesar 3,09% , sedangkan rasio tulangan lateral dari sengkang (ρ_{ss}) sebesar 3,90%. *Confinement crosssties* dipasang di kedua sisi penampang balok karena kondisi tarik dan tekan yang saling bergantian akibat pembebanan siklik. Detail penempatan *confinement crosssties* pada sengkang seperti terlihat pada Gambar 1. Pada penampang *stub* dipasang tulangan utama D16 dengan tegangan leleh tulangan $f_y = 402 \text{ MPa}$ sebanyak 14 buah yang tersebar merata di keempat sisinya. Tulangan

utama *stub* menyediakan rasio penulangan sebesar 2,81% dari luas penampang bruto *stub*.



Gambar 1. Detail crossties

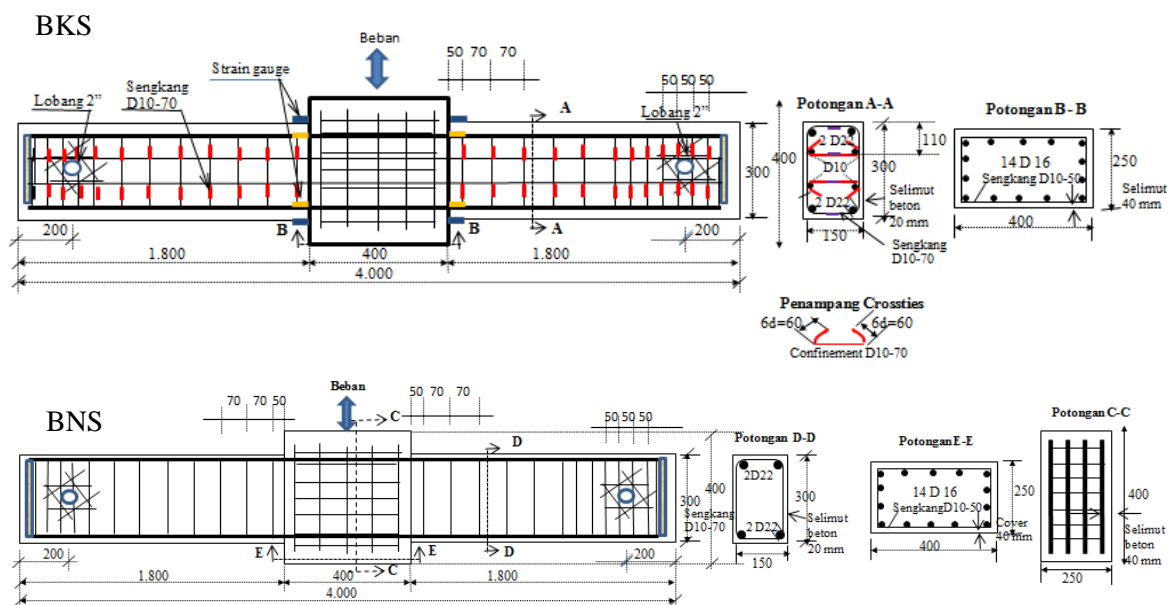
Selimit beton pada *stub* diambil 40 mm. Tulangan sengkang untuk *stub* diberikan D10-50. Selain tulangan utama, sengkang, maupun tulangan *confinement*, pada spesimen balok diberikan pula perkuatan tulangan di daerah sekitar lubang as/poros tumpuan berupa batang-batang tulangan yang saling bersilangan. Hal ini dilakukan guna menghindari terjadinya kerusakan akibat geser sekitar daerah tumpuan.

Tumpuan berupa sendi dan rol dipasang pada as tinggi balok, dan berjarak 200 mm dari ujung balok kiri maupun kanan. Poros tumpuan terbuat dari baja pejal berdiameter 2 inch dan dilapisi pipa baja setebal ±3 mm guna menghindari terjadinya kontak langsung antara baja pejal dan beton yang dapat mengakibatkan kerusakan pada daerah tersebut. Detail penulangan dan tumpuan dari spesimen balok ditampilkan pada Gambar 2.

Dalam penelitian ini spesimen balok maupun *stub* dibuat dengan mutu beton yang sama yaitu beton normal mutu campuran rencana 25 MPa dengan menggunakan metode pencampuran adalah metode DOE (*Development of Environment*). Campuran beton dibuat dengan $w/c = 0,60$ dan menghasilkan nilai *slump* rata-rata 100 mm. Komposisi campuran beton terdiri dari agregat kasar (*split*) berdiameter maksimum 9,5 mm dan agregat halus (pasir) dari quari lokal serta semen Portland type I yang merupakan semen untuk kegunaan umum. Selain itu juga ditambahkan abu terbang (*fly ash*) type F dan juga *superplasticizer* jenis *Plastiment V50* masing-masing sebesar 25% dan 0,25% dari berat semen. *Superplasticizer* dipergunakan untuk membantu kelecakan pada campuran beton. Air pencampur untuk beton diambil dari air sumur artesis yang memenuhi syarat untuk air pada beton. Komposisi campuran beton yang dipergunakan seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi campuran beton (Priastiwi et al., 2017)

Material	Berat (kg/m ³)	Volume (%)
Semen type I	331,00	13,76
Fly ash type f	83,00	3,45
Agregat kasar	982,00	40,83
Agregat halus	787,00	32,73
<i>Superplasticizer plastiment V50</i>	0,84	0,03
Air	221,00	9,19
Total berat/m ³	2405,00	100,00



Gambar 2. Benda uji BKS dan BNS

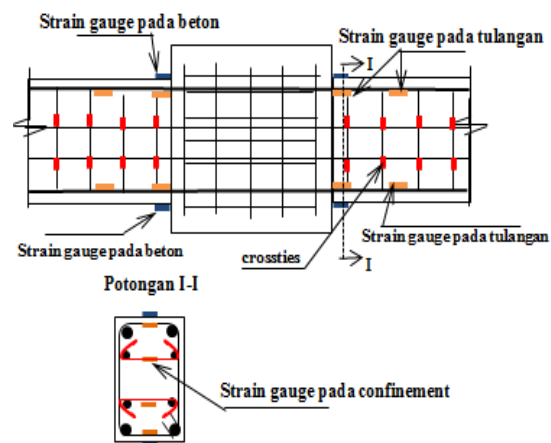
Untuk penamaan spesimen balok, benda uji dengan confinement crossties di zona tekannya diberi nama BKS yang nantinya akan dibandingkan dengan benda uji tanpa confinement yang diberi nama BNS.

Instrumentasi dan sistem pembebanan

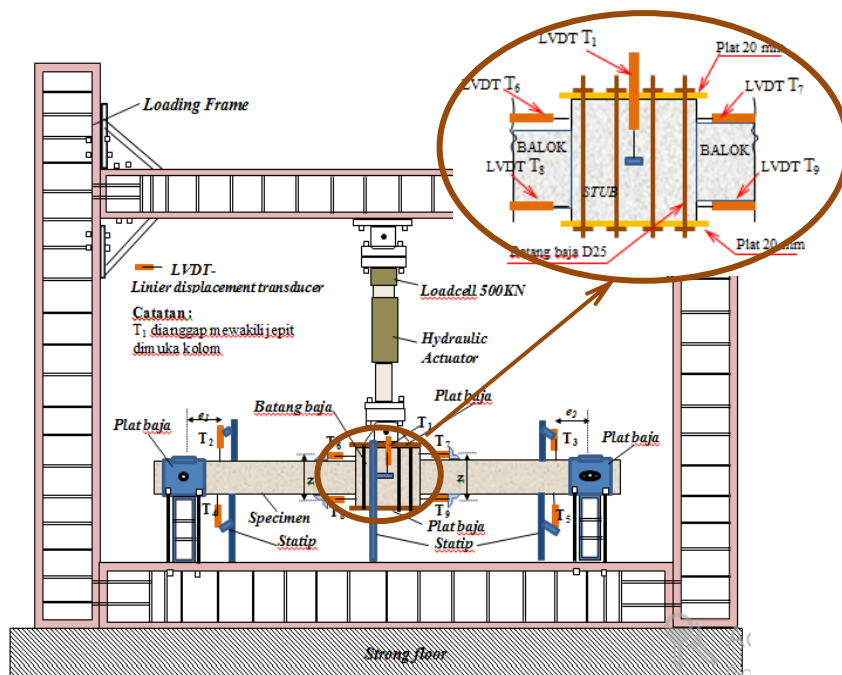
Dalam penelitian ini pada spesimen dipasang beberapa instrumentasi yang digunakan untuk mengumpulkan data di tiap pengujian, termasuk diantaranya data regangan beton, regangan baja tulangan, defleksi pada balok maupun besarnya gaya yang diberikan. Instrumen untuk pengukur regangan digunakan *strain gauge* yang dipasang pada baja tulangan maupun pada beton. *Strain gauge* untuk baja dipakai dua *type*, yaitu *type* YFLA-5 panjang 50 mm untuk tulangan utama longitudinal dan *type* FLA-6-11 dengan panjang 60 mm untuk tulangan *confinement*, sedangkan untuk beton dipasang *strain gauge* *type* PL-60-11 dengan panjang 60 mm. *Strain gauge* untuk baja tulangan dipasang sebelum dilakukan pengecoran beton, sedangkan *strain gauge* untuk beton dipasangkan pada permukaan beton sesudah beton mengeras. Pemasangan *strain gauge* menggunakan lem khusus untuk *strain gauge* agar *strain gauge* tidak mengalami kerusakan saat pemasangan. Posisi pemasangan *strain gauge* pada spesimen ditampilkan secara detail pada Gambar 3.

Selain *strain gauge*, instalasi penting lain yang dipasang pada benda uji adalah *Linier Variables Displacement Transducers (LVDT)* yang berguna untuk mengukur *displacement* saat benda uji

diberikan pembebanan. Satu buah LVDT dipasang vertikal pada muka *stub* dibagian tengah dan dua pasang LVDT yang dipasang horizontal di bagian atas dan bawah balok di muka *stub*. LVDT vertikal digunakan untuk mengukur lendutan (*displacement*) balok, sedangkan LVDT horizontal untuk mengukur kurvatur dari balok. Alat *hydraulic actuator* berkapasitas 500 kN serta *loadcell* dengan kapasitas serupa dipasang untuk memberikan pembebanan. Seluruh instrumen yang terpasang dalam penelitian ini akan tersambung dengan *data logger* *type* TDS-303 yang dilengkapi dengan 50 *channel* data serta layar monitor sebagai alat perekam data. *Set up* pengujian merujuk pada penelitian Priastiwi *et al* (2017) seperti ditampilkan pada Gambar 4.

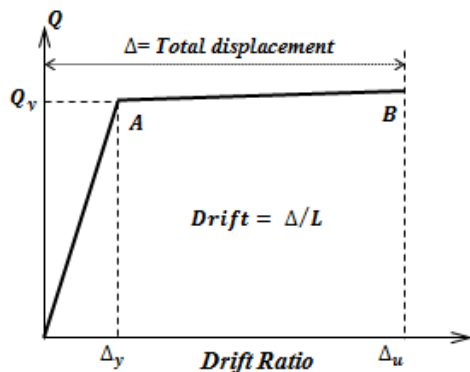


Gambar 3. Instrumentasi pada spesimen.

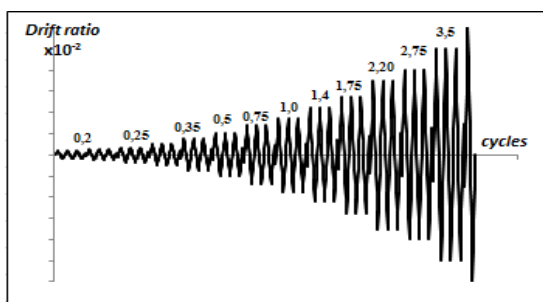


Gambar 4. Set up pengujian (Priastiwi *et al.*, 2017)

Pembebanan siklik diberikan dengan sistem *displacement control* dengan model *quasi static*. Sistem pembebanan spesimen diberikan ditengah bentang, balok, tepatnya pada as *stub* berupa beban terpusat bolak-balik (siklik). Hal ini dilakukan dengan maksud agar dapat diperoleh area momen dan terbesar di muka *stub*. *cyclic loading*, yaitu suatu teknik pemberian beban yang diaplikasikan secara bertahap dan cukup pelan sehingga pengaruh inerti dinamik dan pengaruh laju regangan (*strain rate*) pada material diabaikan (ACI 374.2R-13). *Drift ratio* (DR) dipilih untuk menilai kinerja komponen deformasi dan urutan beban diberikan sesuai ACI 374.R-05 dimana pada tiap *drift ratio* menerapkan tiga siklus bolak balik secara penuh. Urutan *drift ratio* yang disarankan dimulai dari DR 0,2%; 0,25%; 0,35%; 0,5%; 0,75%; 1,0%; 1,4%; 1,75%; 2,20%; 2,75%; dan 3,5% seperti terlihat pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Deformasi komponen (ACI 374.1-05)



Gambar 6. Urutan Siklus Pembebanan (ACI 374.1-05)

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan selama pengujian menunjukkan bahwa baik balok dengan *confinement crosssties* (BKS) maupun balok tanpa *confinement* (BNS) di zona tekannya mengalami keretakan dimulai dari tepi bagian atas dan bagian bawah balok yang kemudian menjalar ke arah garis netral penampang balok seiring dengan meningkatnya beban siklik yang diberikan. Pembacaan *strain gauge* menunjukkan kelelahan tulangan

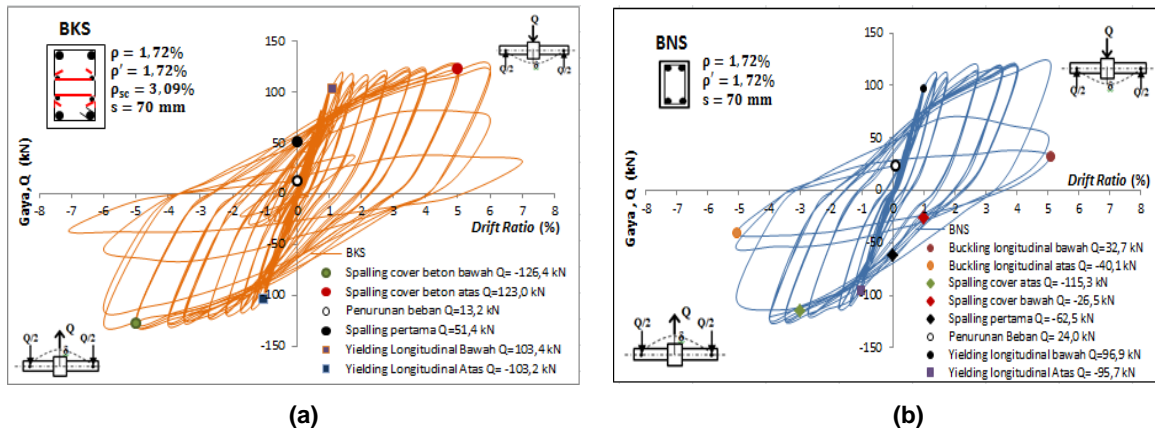
longitudinal pada BKS terjadi saat beban (Q) sebesar 103 kN di *drift ratio* 1,07%, kemudian diiringi terkelupasnya selimut beton (*spalling*) saat Q sebesar 123 kN, sedangkan pada BNS leleh tulangan longitudinal terjadi di Q sebesar 96 kN di *drift ratio* 1,06% dan *spalling* saat Q sebesar 115 kN.

Pada akhir pengujian ditunjukkan bahwa kerusakan terberat terjadi pada daerah sendi plastis balok di muka *stub* dengan Q_{max} untuk BKS adalah 125 kN untuk pembebanan tekan dan 126 kN untuk pembebanan tarik, sedangkan pada BNS sebesar 118 kN dan 121 kN untuk pembebanan tekan dan tarik. Selama pengujian BKS mengalami siklus pembebanan sebanyak 43 siklus yang merupakan *step* pertama pada *drift ratio* 0,07, sedangkan BNS mengalami siklus yang jauh lebih rendah yaitu 33 siklus pada *drift ratio* 0,04.

Keberadaan *confinement crosssties* di zona tekan balok mampu meningkatkan ketahanan balok menahan beban siklik dengan terbentuknya siklus yang lebih banyak dan tetap stabil dibandingkan BNS. Saat-saat awal antara BKS dan BNS menunjukkan kesamaan, namun mendekati tegangan ultimit tercapai dan terjadi penjarangan retak, beton akan mengembang dan menekan tulangan transversal. Adanya *confinement crosssties* yang mengekang wilayah tekan beton mampu menahan beton dan meningkatkan daktilitas balok secara signifikan seperti ditunjukkan pada kurva hysteresis Gambar 7.

Pemberian *confinement crosssties* yang menempel di sengkang penahan geser mampu menambah tekanan pengekan dalam arah transversal dan berkontribusi dalam meningkatkan daktilitas dari balok. Kondisi yang sama juga terjadi pada spesimen balok yang diberikan tambahan *confinement* berbentuk persegi/*hoops* (Priastiwi *et al.*, 2017) dimana adanya *hoops* di zona tekan balok meningkatkan 50 hingga 65% daktilitasnya dibanding balok tanpa *confinement* di zona tekannya, sedangkan penggunaan *confinement* spiral oleh Hadi & Schmidh (2002) maupun Tee *et al* (2017) juga dikatakan bahwa dengan *confinement* spiral yang melingkar di zona tekan balok yang diberi pembebanan lentur mampu meningkatkan kinerja balok maupun daktilitasnya.

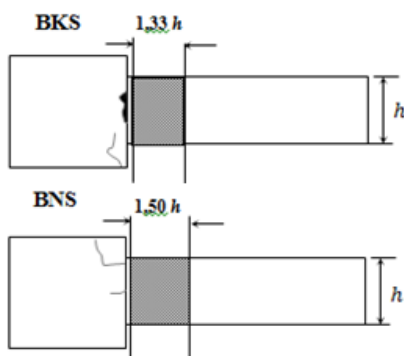
Hasil pembacaan *strain gauge* yang terpasang pada *confinement crosssties* menunjukkan bahwa saat terjadi beban ultimit, regangan sebesar 0,00186 dan 0,00136 di sisi yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa tulangan D10 yang dipakai sebagai tulangan *confinement* belum mengalami kelelahan saat terjadinya beban ultimit sehingga mampu mendukung peningkatan daktilitas baloknya.



Gambar 7. Kurva hysteresis BKS dan BNS yang dikenai siklik

Baik pada spesimen BKS maupun BNS menunjukkan bahwa kegagalan terjadi pada daerah sendi plastis balok yang diawali pada jarak berkisar 150 hingga 200 mm jauh dari muka *stub* dan bertambah luas hingga sampai ke muka *stub*. Kondisi tersebut mirip dengan pernyataan Sheikh & Khoury (1993) yang juga menggunakan model *stub* dalam penelitian, dimana keduanya menyakini bahwa *restrain* dari *stub* berkurang secara bertahap karena berkurangnya kekakuan dari wilayah tersebut setelah dimulainya kegagalan.

Hasil akhir pengujian menunjukkan bahwa wilayah kerusakan BKS dan BNS berada pada rentang 1,33 hingga 1,50 dari tinggi balok (*h*). Hal ini menunjukkan bahwa retakan masih berada pada daerah yang disyaratkan untuk sendi plastis balok yaitu $2h$ dari muka kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Wilayah kerusakan BKS dan BNS

Sementara itu dalam hasil pengujian ditunjukkan pula, adanya *confinement crosssties* di zona tekan balok berpengaruh signifikan terhadap perilaku balok terutama daktilitasnya, baik daktilitas *displacement* (μ_Δ) maupun daktilitas kurvturnya (μ_ϕ). Selain daktilitas, rasio kumulatif perpindahan (N_Δ) yang bertujuan untuk melihat nilai kumulatif perpindahan inelastik yang terjadi pada spesimen, dan juga nilai indeks kumulatif disipasi energi (W) untuk menunjukkan karakteristik disipasi energi

spesimen juga menunjukkan pengaruh yang signifikan. Nilai-nilai yang menjadi target tersebut diperoleh dengan menggunakan kurva *envelope* untuk *displacement* dan kurvatur yang mengacu pada penelitian Bayrak & Sheikh (1998).

Kurva *hysteresis* yang dihasilkan pembebanan siklik dibuat kurva *envelope* terlebih dahulu untuk *displacement* maupun kurvturnya. Nilai Q_{max} maupun M_{max} yang merupakan rata-rata nilai maksimal gaya maupun momen dalam dua arah pembebanan dan nilai $0,8 Q_{max}$ merupakan titik terjadinya penurunan gaya maksimal sebesar 20% yang digunakan untuk menentukan kriteria ultimit. Daktilitas *displacement* dihitung dari perbandingan *displacement ultimit* (Δ_2) dan *displacement* saat pertama leleh (Δ_1), sementara daktilitas kurvatur dihitung dengan membandingkan antara kurvatur ultimit (ϕ_2) dan kurvatur saat leleh (ϕ_1). Nilai rasio kumulatif daktilitas (N_Δ) dan nilai indeks kumulatif disipasi energi (W) didapatkan dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2) serta Gambar 9.

$$N_\Delta = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_i}{\Delta_1} \quad (1)$$

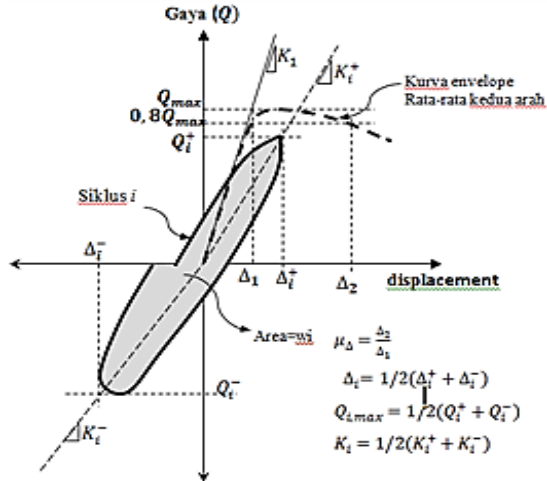
dan

$$W = \frac{1}{Q_{max}\Delta_1} \sum_{i=1}^m w_i \left(\frac{K_i}{K_1} \right) \left(\frac{\Delta_i}{\Delta_1} \right)^2 \quad (2)$$

Dimana w_i ($1..m$) merupakan luas area siklus kurva ke-*i*, $K_{i(1..m)}$ merupakan kemiringan siklus kurva ke-*i*, K_1 merupakan kekakuan elastis efektif, $\Delta_{i(1..m)}$ merupakan *displacement* maksimum siklus ke-*i* dan Q_{max} merupakan gaya maksimum.

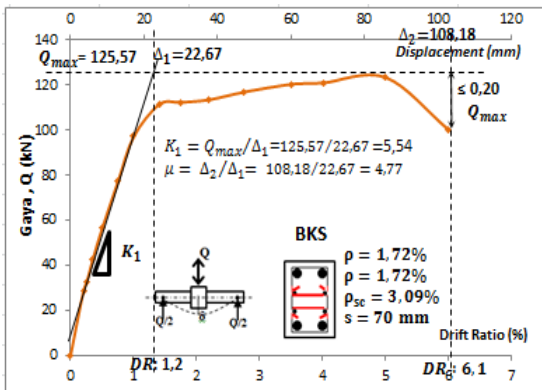
Kurva *envelope* rata-rata BKS menunjukkan bahwa spesimen ini memiliki beban maksimum (Q_{max}) rata-rata dalam dua arah pembebanan sebesar 125,57 kN. Perpotongan Q_{max} dengan kemiringan awal kurva dapat ditentukan

displacement lelehnya yaitu sebesar 22,67 mm, dan saat beban mulai turun hingga maksimum 20% dari beban puncak dapat ditentukan *displacement* ultimitnya yaitu sebesar 108,18 mm pada *drift ratio* 6,1%.



Gambar 9. Parameter daktilitas (Bayrak & Sheikh, 1998)

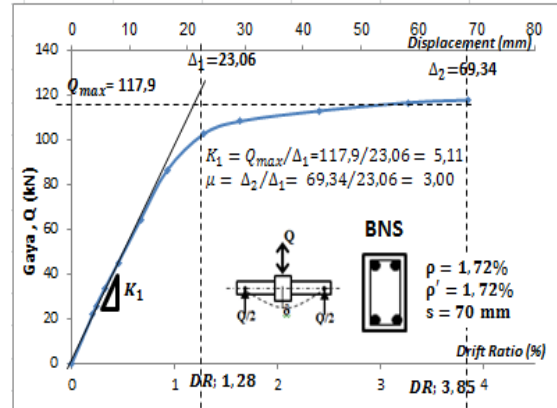
Berdasarkan nilai *displacement* leleh dan *displacement* ultimit serta Q_{max} untuk BKS didapatkan daktilitas *displacement* (μ_{Δ}) yaitu sebesar 4,77 dan nilai kekakuan elastis efektif (K_1) = Q_{maks}/Δ_1 sebesar 5,54 seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Adapun BNS memiliki beban maksimum (Q_{max}) rata-rata sebesar 117,9 kN, dengan menarik garis kemiringan kurva dengan beban maksimum dapat diketahui *displacement* leleh untuk pembebanan siklik (Δ_1) sebesar 23,06 mm pada *drift ratio* 1,28. Saat penurunan beban maksimum 20% dari Q_{max} didapatkan *displacement* ultimit (Δ_2) sebesar 69,34 mm pada *drift ratio* 3,85%. Dengan demikian daktilitas *displacement* (μ_{Δ}) dan nilai kekakuan elastis efektif (K_1) spesimen BNS masing-masing sebesar 3,00 dan 5,11 seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 10. Kurva envelope perilaku spesimen BKS

Berdasarkan nilai beban maksimum Q_{max} ,

displacement leleh Δ_1 , kekakuan elastis efektif K_1 , serta luas masing-masing *loop* dapat ditentukan nilai rasio kumulatif daktilitas *displacement* (N_{Δ}) dan nilai indeks kumulatif disipasi energi (W) pada BKS dan BNS seperti ditampilkan pada



Gambar 11. Kurva envelope perilaku spesimen BNS

Tabel 2. Nilai-nilai dalam Tabel 2 menunjukkan peningkatan karena pengaruh *confinement* tidak hanya pada *drift ratio* maupun daktilitas *displacement*, namun juga nilai rasio kumulatif daktilitas *displacement* (N_{Δ}) yang meningkat hampir 98%, demikian juga indeks kumulatif disipasi energi (W) yang meningkat enam kali lipat dibanding balok tanpa *confinement* di zona tekannya.

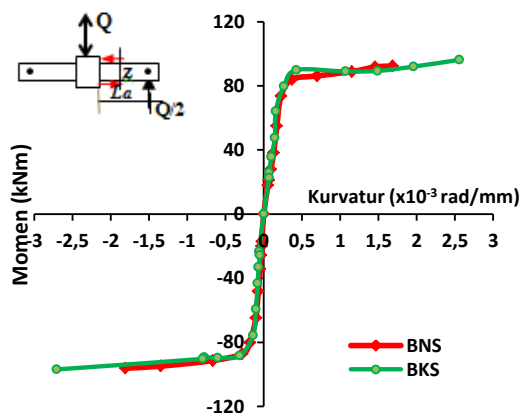
Tabel 2. Nilai pengujian BKS dan BNS

Hasil	BKS	BNS	Peningkatan BKS terhadap BNS (%)
<i>Drift ratio</i> (%)	6,10	3,85	58,44
Q_{maks} (kN)	125,57	117,90	6,51
μ_{Δ}	4,77	3,01	58,70
N_{Δ}	70,86	35,80	97,92
W ($\times 10^8$)	60,67	8,62	604,00

Keberadaan *confinement crosssties* di zona tekan balok mampu memperpanjang deformasi plastis dari elemen sebelum terjadinya keruntuhan dengan adanya sendi plastis yang lebih daktil. Untuk nilai kurvatur diperoleh dari pembacaan data LVDT yang terpasang horisontal pada ujung balok muka *stub* (T_6 - T_9) pada Gambar 4. LVDT horisontal diletakkan pada bagian atas dan bagian bawah balok dengan jarak satu sama lain sejauh z . Besarnya momen untuk daerah sendi plastis dicari berdasarkan keseimbangan gaya sehingga $M = (Q/2 * L_a)$, dimana L_a merupakan jarak antara tumpuan dengan muka *stub*. Besarnya nilai kurvatur dicari dengan menggunakan data perpindahan horisontal LVDT atas (Δ_c) dan

bawah (Δ_s) yang dibagi dengan panjang mula-mula untuk mendapatkan nilai regangan ε_c dan ε_s . Kemudian dari distribusi regangan diatas dan dibawah tersebut, perputaran kurvatur dapat dicari yaitu $\varphi = (\varepsilon_c + \varepsilon_s)/z$.

Penentuan nilai kurvatur leleh (φ_y) sama seperti pada *displacement* yaitu dengan menggunakan perpotongan antara garis horizontal dari M_{max} dengan kemiringan kurva pada kondisi elastis, dan setelah besarnya momen mengalami penurunan maksimal 20% dari M_{max} dapat ditentukan nilai kurvatur ultimitnya (φ_u). Untuk memperoleh daktilitas kurvatur (μ_φ) maka nilai kurvatur yang terjadi (φ_u) dibagi dengan nilai kurvatur saat leleh (φ_y). Kurva *hysteresis* momen-kurvatur yang kemudian dirubah dalam kurva *envelope* dua arah momen-kurvatur ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Kurva *envelope* dua arah BKS dan BNS

Kurva *envelope* momen-kurvatur dua arah tersebut kemudian dijadikan kurva *envelope* rata-rata dan kemudian dicari nilai-nilai pentingnya seperti halnya pada *displacement* dan didapatkan hasil seperti tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Nilai kurvatur BKS dan BNS

Kondisi	BKS	BNS	BKS terhadap BNS	
M_{maks} (kN.m)	100,46	94,32 ↑	6,51 %	
φ_1 ($\times 10^{-3}$ rad/mm)	0,20	0,22		
φ_2 ($\times 10^{-3}$ rad/mm)	2,82	1,75		
μ_φ	14,03	7,87 ↑	78,18 %	

Kurva momen-kurvatur tersebut menunjukkan perilaku yang daktil dari spesimen BKS dengan momen maksimum sebesar 100,46 kNm, dengan kurvatur leleh (φ_1) sebesar $0,201 \times 10^{-3}$ rad/mm serta kurvatur ultimit (φ_2) sebesar $2,819 \times 10^{-3}$ rad/mm. Dengan demikian momen kurvatur (μ_φ) untuk spesimen BKS adalah 14,03. Pada BNS

momen maksimum yang dapat dicapai adalah 94,32 kNm, kurvatur leleh (φ_1) sebesar $0,222 \times 10^{-3}$ rad/mm, dan nilai kurvatur ultimit (φ_2) adalah sebesar $1,748 \times 10^{-3}$ rad/mm. Dengan membandingkan nilai kurvatur ultimit dengan kurvatur saat leleh diperoleh nilai daktilitas kurvatur (μ_φ) spesimen BNS adalah 7,87.

Kesimpulan

Berdasarkan kajian eksperimental yang telah dilakukan pada balok dengan *confinement crosssties* dan balok tanpa *confinement* di zona tekannya dapat disimpulkan bahwa adanya *confinement* di zona tekan penampang balok khususnya berupa *confinement crosssties* yang dikaitkan dengan sengkang penahan geser mampu meningkatkan daktilitas daerah sendi plastis balok secara signifikan, seperti halnya penelitian sebelumnya oleh peneliti yang menggunakan *confinement* berbentuk *hoop*.

Pemberian *confinement crosssties* yang menempel di sengkang penahan geser mampu menambah tekanan pengekan dalam arah transversal dan berkontribusi dalam meningkatkan daktilitas dari balok peningkatan daktilitas yang terjadi meliputi daktilitas *displacement* 58,7% dan daktilitas kurvatur sebesar 78,2% bila dibandingkan dengan balok tanpa *confinement*. Adanya *crosssties* di zona tekan juga meningkatkan ketahanan balok terhadap beban siklik menjadi 43 siklus dibanding balok tanpa *confinement* yang hanya mampu bertahan hingga 33 siklus dengan nilai kumulatif perpindahan inelastik yang terjadi pada spesimen hingga 98% dan nilai disipasi energinya enam kali lipat dibanding balok tanpa *confinement* di zona tekannya. Namun demikian untuk kapasitas beban serta kapasitas momen kenaikannya kurang signifikan, hanya berkisar 6,5%. Kondisi ini juga terjadi pada daerah sendi plastis balok yang diberikan pengekan berupa *hoops* yang juga tidak signifikan dalam penambahan kapasitas bebannya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada LPPM Undip yang telah memberikan dana penelitian Hibah RPP dan juga kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

ACI (American Concrete Institute). (2005). Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary: An ACI Standard. American Concrete Institute. 374.R-05

- ACI (American Concrete Institute). (2013). Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads. *374.2 R-13*.
- Bae, S., & Bayrak, O. (2008). Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, *105*(3), 290.
- Base, G. D. (1962). Helical Reinforcement in the Compression Zone of Concrete Beams. *Constructional & Engineering*, 456-460.
- Base, G. D., & Read, J.B. (1965). Effectiveness of Helical Binding in the Compression Zone of Concrete Beams. *Journal Proceedings*, *62*(7), 763-781.
- Bayrak, O., & Sheikh, S. A. (1998). Confinement Reinforcement Design Considerations for Ductile HSC Columns. *Journal of Structural Engineering*, *124*(9), 999-1010.
- Delalibera, R. G., & Giongo, J. S. (2008). Theoretical and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Beams with Confinement Reinforcement. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, *1*(1), 17-30.
- Hadi, M. N., & Elbasha, N. (2007). Effects of Tensile Reinforcement Ratio and Compressive Strength on the Behaviour of Over-reinforced Helically Confined HSC Beams. *Construction and Building Materials*, *21*(2), 269-276.
- Hadi, M. N., & Schmidt, L. C. (2002). Use of Helixes in Reinforced Concrete Beams. *Structural Journal*, *99*(2), 191-198.
- Imran, I., Bing, L., Meas, K., & Hoedajanto, D. (2009). Permasalahan Detailing pada Bangunan Beton Bertulang Sederhana Tahan Gempa. *Prosiding Seminar HAKI*, Jakarta.
- Jeffrey, R., & Hadi, M. N. (2008). The Effect of Confinement Shapes on Over-reinforced HSC Beams. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *40*, 286-293.
- Leung, H. Y., & Burgoyne, C. J. (2005). Uniaxial Stress-strain Relationship of Spirally Confined Concrete. *ACI materials journal*, *102*(6), 445.
- Moehle, J. P., & Cavanagh, T. (1985). Confinement Effectiveness of Crossties in RC. *Journal of Structural Engineering*, *111*(10), 2105-2120.
- Priastiwi, Y. A., Imran, I., & Hidayat, A. (2014). Behavior of Ductile Beam with Addition Confinement in Compression Zone. *Procedia Engineering*, *95*, 132-138.
- Priastiwi, Y. A., & Imran, I. (2015). The Effect of Different Shapes of Confinement in Compression Zone on Beam's Ductility Subjected to Monotonic Loading. *Procedia Engineering*, *125*, 918-924.
- Priastiwi, Y. A., Imran, I., Nuroji, & Hidayat, A. (2017). Confinement Hoops of Compression Zone in Beam Under Cyclic Loading. *AIP Conference Proceedings*, 1903. (1), 0200091-7.
- Sakai, K., & Sheikh, S. A. (1989). What do We Know about Confinement in Reinforced Concrete Columns? (A Critical Review of Previous Work and Code Provisions). *ACI Structural journal*, *86*(2), 192-207.
- Sheikh, S. A., & Khoury, S. S. (1993). Confined Concrete Columns with Stubs. *ACI Structural Journal*, *90*, 414-431.
- Nasional, B. S. (2012). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung SNI 1726*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Indonesia, S. N. (2013). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung SNI 2847*. Jakarta: Standar Nasional Indonesia.
- Tee, H. H., Al-Sanjery, K., & Chiang, J. C. L. (2017). Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Confined Concrete Related to Ultimate Bending and Shear Strength. *AIP Conference Proceedings*, *1818* (1), 020060-9. AIP Publishing.
- Ziara, M. M., Haldane, D., & Kuttub, A. S. (1995). Flexural Behavior of Beams with Confinement. *Structural Journal*, *92*(1), 103-114.
- Whitehead, P. A., & Ibell, T. J. (2004). Deformability and ductility in over-reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete research*, *56*(3), 167-177.