

Retrofitting Sambungan Kolom-Balok Beton Bertulang Ekspansi Planar Segitiga dengan Variasi Ukuran

Sigit Hernowo¹⁾ dan Ade Lisantono²⁾

¹⁾ Alumni Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana
Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 43 Yogyakarta
E-mail: sigit_hernowo@yahoo.com

²⁾ Staf Pengajar Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana
Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 43 Yogyakarta
E-mail: adelisantono@mail.uajy.ac.id

Abstract

Highly seismic activities in Indonesia, that is followed by a lot of high magnitude earthquakes, make awareness of the people to anticipate the damage that caused by this disaster. The Codes of earthquake have changed and are accompanied by the change of seismic region. There must be some efforts to improve the existing building structure. One of the efforts is retrofitting the beam-column joint which is the weakest element of structure in the building when subjected to earthquake loading. Four beam-column joint reinforced concrete specimens, namely SJC, SJ-01, SJ-02, and SJ-03, made of normal concrete and plain reinforcement were tested in this experimental program. Beam with 150 mm width, 250 mm high, and 1500 length be jointed with column that has section area of 250 mm x 250 mm, and 1750 mm length. The specimens of SJ-01, SJ-02 and SJ-03 were retrofitted by triangular voute in lower side of the beam in the beam column joint region with 125 mm, 187.5 mm, and 250 mm side length, respectively. All specimens are tested with cyclic loading using hydraulic actuator. The results show that the increasing strength of specimen SJ-01 and SJ-03 compare to the reference specimen were 12.74% and 10.29%, respectively. While the strength of specimen SJ-02 a little bit decreases compare to the reference specimen.

Keywords: beam-column joint, reinforced concrete, retrofitting, voute, cyclic loading.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan aktivitas kegempaan yang sangat tinggi. Dalam rentang waktu antara tahun 1897 – 2009 tercatat telah terjadi lebih dari 14.000 kejadian gempa dengan magnituda $M > 5,0$ SR (Irsyam dkk, 2010). Regulasi perencanaan bangunan terkait dengan aktivitas gempa mulai digunakan sejak tahun 1983 dan telah diperbaharui pada tahun 2002 dan 2012.

Selain menyebabkan korban jiwa, gempa bumi seringkali juga merusak infrastruktur. Mengingat lokasi kejadian yang tidak bisa diperkirakan secara akurat dan kebutuhan wilayah yang mendesak, usaha untuk mengurangi dampak gempa dilakukan dengan perencanaan dan

pembangunan bangunan sipil yang tahan gempa.

Salah satu kerusakan yang sering terjadi pada gedung bertingkat akibat gempa adalah pada sambungan kolom-balok. Beberapa metode telah dikembangkan untuk memberikan perkuatan elemen tersebut.

Ghobarah dkk (1997) telah mempelajari model keruntuhan sambungan kolom-balok yang didesain pada decade 1970-an. Perkuatan dengan jaket baja bergelombang yang diisi dengan injeksi *non-shrink grout* terbukti efisien untuk rehabilitasi pada struktur yang telah ada dan tidak didesain untuk kebutuhan peraturan seismik.

Hakuto dkk (2000) telah melakukan penelitian dengan membandingkan spesimen sambungan kolom-balok dengan

penulangan buruk menggunakan desain seperti bangunan tahun 1970 kemudian diperkuat dengan jaket beton dan spesimen yang didesain untuk mengakomodasi beban seismik. Sambungan kolom-balok yang diperkuat dengan jaket beton baru mengalami peningkatan kekakuan, kekuatan, dan daktilitas, meskipun masih di bawah sambungan kolom-balok yang didesain untuk mengakomodasi beban seismik.

Sulendra (2005) telah melakukan pengujian pada sambungan kolom-balok yang diperkuat dengan pemasangan jaket pada bagian kolom. Metode ini meningkatkan kemampuan menahan beban geser sampai 80% dari kemampuan awalnya, serta meningkatkan daktilitas kolom, kekakuan, kekuatan, dan disipasi energi secara signifikan. Chaimahawan dan Pimanmas (2009) melakukan pengujian pada sambungan kolom balok yang diperkuat dengan ekspansi planar segiempat dan segitiga. Kolom-balok beton didesain seperti pada struktur umumnya yang telah ada di Thailand. Metode perkuatan ini terbukti efektif untuk meningkatkan kekakuan, kekuatan, disipasi energi, dan daktilitas, dengan performa yang seimbang, namun perkuatan segiempat lebih efektif untuk menunda keretakan beton pada zona kompresi.

2. Fundamental

Dalam desain gedung bertingkat, kolom akan bertemu dengan balok. Daerah pertemuan itu merupakan sambungan. Sambungan seringkali menjadi bagian terlemah dari sistem struktur.

Ada banyak cara yang mungkin ditempuh untuk menentukan jenis pembebanan dan kombinasinya. Identifikasi yang tepat pada masalah ini menjadi kunci sukses untuk menentukan detail sambungan. Kebutuhan dasar untuk performa sambungan menurut Park dan Paulay (1975) adalah sebagai berikut:

- Sambungan menunjukkan performa beban layan sama dengan kualitas elemen yang disambung.
- Sambungan memiliki kekuatan yang paling tidak berhubungan dengan

kombinasi beban merugikan yang dapat didukung oleh elemen yang disambung.

- Kekuatan sambungan tidak menentukan kekuatan struktur dan perilakunya tidak menghalangi pengembangan kekuatan penuh elemen yang disambung.
- Mudah dibuat dan memiliki akses untuk menempatkan dan memadatkan beton.

Ada tiga jenis sambungan yang erring ditemui, yaitu sambungan sudut (*knee*), sambungan eksterior, dan sambungan interior. Sambungan *knee* adalah sambungan antara dua elemen yang membentuk sudut. Jenis ini paling umum dijumpai pada sudut rangka portal. Sambungan eksterior adalah sambungan yang terletak di tepi bangunan, yang terdiri dari kolom dengan dua atau tiga balok. Sambungan interior merupakan sambungan di tengah bangunan yang umumnya memiliki satu kolom dan empat balok.

Sambungan kolom-balok eksterior dan interior diidentifikasi sebagai salah satu bagian yang kritis pada struktur bangunan, yang pada banyak kejadian, kegagalannya dapat menyebabkan keruntuhan bangunan. Model kegagalan yang umum adalah kegagalan geser sambungan dan kegagalan angkur tulangan longitudinal terhadap sambungan (Supaviriyakit dan Pimanmas, 2008). Beberapa metode perbaikan telah diperkenalkan. Jaket beton menjadi salah satu metode yang populer (Alcocer dan Jirsa, 1993). Namun metode ini memiliki keterbatasan, yaitu menyebabkan penambahan besar ukuran di lantai ruang yang mengurangi pemakaian praktis bangunan.

Metode perkuatan sambungan menggunakan jaket pelat baja, CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*), dan SIFCON (*slurry infiltrated fibrous concrete*) dapat dikerjakan dengan mudah dan cepat. Perbaikan perilaku sambungan juga terjadi secara signifikan. Namun metode ini dibatasi oleh sifat-sifat material itu sendiri, seperti ketahanan terhadap korosi, cuaca, air, dan sebagainya.

Metode perkuatan dengan ekspansi planar juga relatif mudah diaplikasikan, dengan material konvensional yang ekonomis dan mudah didapat. Ekspansi planar dapat disembunyikan di dinding atau

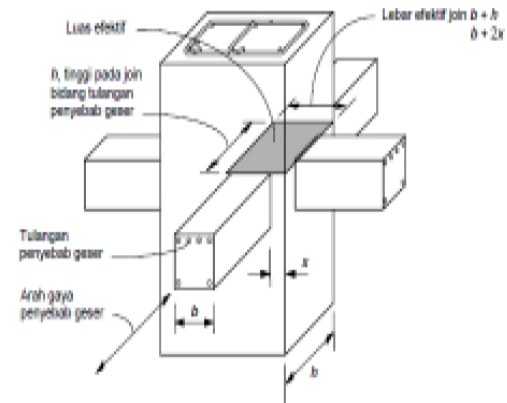
plafon, sehingga tidak mengganggu fungsi ruangan. Namun metode ini menyebabkan ukuran balok menjadi lebih pendek, sehingga cenderung mengarah pada kegagalan geser.

Beton memiliki kuat tekan yang relatif tinggi dibandingkan dengan bahan-bahan lain, tetapi kuat tariknya sangat rendah, sehingga memerlukan tulangan tarik. Tulangan tarik untuk beton bertulang menggunakan serat yang terbuat dari baja, plastik, kaca, dan lain-lain.

Baja merupakan material yang paling sering digunakan sebagai serat tulangan. Sifatnya yang mudah terkena korosi menyebabkan kekuatan beton bertulang berkurang, namun baja ditanam pada beton, sehingga selimut beton akan melindungi baja dari kemungkinan korosi.

Ada dua jenis tulangan yang digunakan pada sambungan kolom-balok, yaitu tulangan longitudinal balok dan tulangan transversal joint. Gaya pada tulangan longitudinal di muka sambungan ditentukan dengan menganggap bahwa tegangan pada tulangan lentur $1,25f_y$. Tulangan yang berhenti pada sebuah kolom harus dilanjutkan sampai sisi terjauh dari inti kolom terkekang dan diangkur. Tulangan longitudinal balok yang diteruskan sampai melewati sambungan, dimensi kolom pada arah sejajar tulangan tersebut tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan terbesar balok untuk beton normal (SNI 03-2847-2013).

Tulangan transversal berbentuk sengkang tertutup harus dipasang pada daerah sambungan, kecuali jika sambungan dikekang oleh komponen struktur yang sesuai. Pada sambungan interior, tulangan transversal dipasang pada daerah sambungan setinggi balok terendah. Menurut SNI 03-2847-2013 kuat geser nominal sambungan untuk sambungan yang dikekang di empat sisi tidak boleh melebihi untuk yang dikekang pada tiga sisi atau dua sisi yang berlawanan $1,25$, dan untuk hubungan lainnya $1,0$. Dengan A_j adalah luas efektif balok yang ditunjukkan pada Gambar 1, sementara f_c' adalah kuat tekan beton.



Gambar 1. Luas efektif sambungan kolom-balok (SNI-03-2487-2002)

Panjang penyaluran tulangan tarik, l_{dh} , untuk tulangan dengan kait standar 90° tidak boleh kurang dari $8d_b$, 150 mm, dan nilai yang ditentukan dengan persamaan 1 untuk diameter tulangan $10 - 36$ mm.

$$l_{dh} = f_y d_b / (5,4 \sqrt{f_c'}) \quad (1)$$

dimana,

f_y = kuat tarik baja tulangan

d_b = diameter nominal batang tulangan

Daktilitas atau keuletan adalah kemampuan material untuk berubah bentuk tanpa mengalami perpatahan. Umumnya daktilitas diukur dengan *ductility ratio* (rasio daktilitas) μ , yaitu perbandingan antara defleksi maksimum (δ_u) dengan defleksi pada saat patah (δ_y), seperti persamaan 2.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

Kekakuan (*stiffness*) adalah gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan perpanjangan satuan. Kekakuan siklus (k_c) diperoleh dari beban lateral maksimum (P_{max}) dibagi dengan defleksi lateral maksimum (δ_m) pada setiap siklus seperti persamaan 3.

$$k_c = \frac{P_{max}}{\delta_m} \quad (3)$$

Hysteretic energy (HE) merupakan energi serapan (energi disipasi) pada balok untuk setiap siklus. Energi disipasi ini diperoleh dari hasil perkalian beban dan defleksi yang diakumulasikan pada setiap siklus, masing-masing tekan dan tarik yang dihitung terpisah. Energi potensial (*PE*, *potential energy*), diperoleh dari luas

segitiga di bawah kurva histerisis untuk setiap siklus.

Rasio redaman viskus ekuivalen (EVDR) merupakan perbandingan energi yang hilang setiap siklus. EVDR ditentukan dengan persamaan 4.

$$EVDR = \frac{HE}{2 \cdot \pi \cdot PE} \quad (4)$$

3. Metodologi

Bahan

Spesimen berupa empat buah sambungan kolom-balok beton bertulang dengan ukuran, bahan, dan cara pembuatan yang identik, sehingga memiliki sifat-sifat yang identik. Bahan pembentuk specimen adalah semen, pasir, batu pecah, besi beton, air, bahan pengisi dan perekat.

Semen yang digunakan adalah semen yang memenuhi persyaratan dalam SNI 15-2049-2004 tentang Semen Portland. Hal ini diidentifikasi dari label yang ada pada kemasannya, tanpa dilakukan pengujian. Pasir yang digunakan berasal dari Gunung Merapi. Sebelum digunakan pasir diuji dengan uji saringan untuk mengetahui gradasinya, serta uji berat jenis dan penyerapan. Batu pecah berasal dari industri pemecah batu di daerah Clereng, Pengasih, Kulonprogo. Batu pecah juga diuji dengan uji saringan serta uji berat jenis dan penyerapan air. Hasil pengujian kedua agregat tersebut digunakan untuk melakukan perencanaan campuran beton.

Besi beton diperoleh dari toko bangunan yang biasa dipakai untuk membuat bangunan pada umumnya. Besi yang digunakan adalah baja polos berdiameter 12 mm untuk tulangan longitudinal dan 8 mm untuk tulangan transversal. Sebelum digunakan dilakukan uji tarik baja, dan dari hasil pengujian diketahui tegangan leleh baja 360 MPa untuk tulangan longitudinal dan 379,71 MPa untuk tulangan transversal.

Air untuk pembuatan beton berasal dari air di Laboratorium Struktur dan Mekanika Bahan, Pusat Studi Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada. Air tidak berasa, tidak berbau, dan jernih sehingga

memenuhi persyaratan untuk pembuatan campuran beton.

Bahan pengisi adalah material yang digunakan untuk mengisi celah antara lubang hasil pengeboran dan tulangan yang ditambahkan pada proses perkuatan sambungan. Bahan berupa *epoxy adhesive* untuk perekat struktur Sikadur-31 CF Normal.

Bahan perekat digunakan untuk merekatkan beton lama pada sambungan kolom-balok dengan beton baru yang digunakan untuk perkuatan. Perekat berupa bahan tambahan untuk mortar *Sika Cim Bonding Adhesive*.

Selain itu digunakan juga kawat ikat untuk merangkai tulangan, kapur, dan spidol. Kapur digunakan untuk mengecat specimen yang selesai dicetak agar pola retakan dapat terlihat lebih jelas. Spidol digunakan untuk memberi garis-garis bujursangkar pada cetakan, untuk memetakan pola retak pada saat pengujian.

Alat

Peralatan yang digunakan untuk pengujian siklik adalah *crane dan tackel, loading frame, strain gauge*, aktuator hidrolik, *jack hidrolik, load cell, LVDT, data logger*, serta *notebook*. *Crane* dan *tackle* digunakan untuk memindahkan specimen yang akan dan telah diuji.

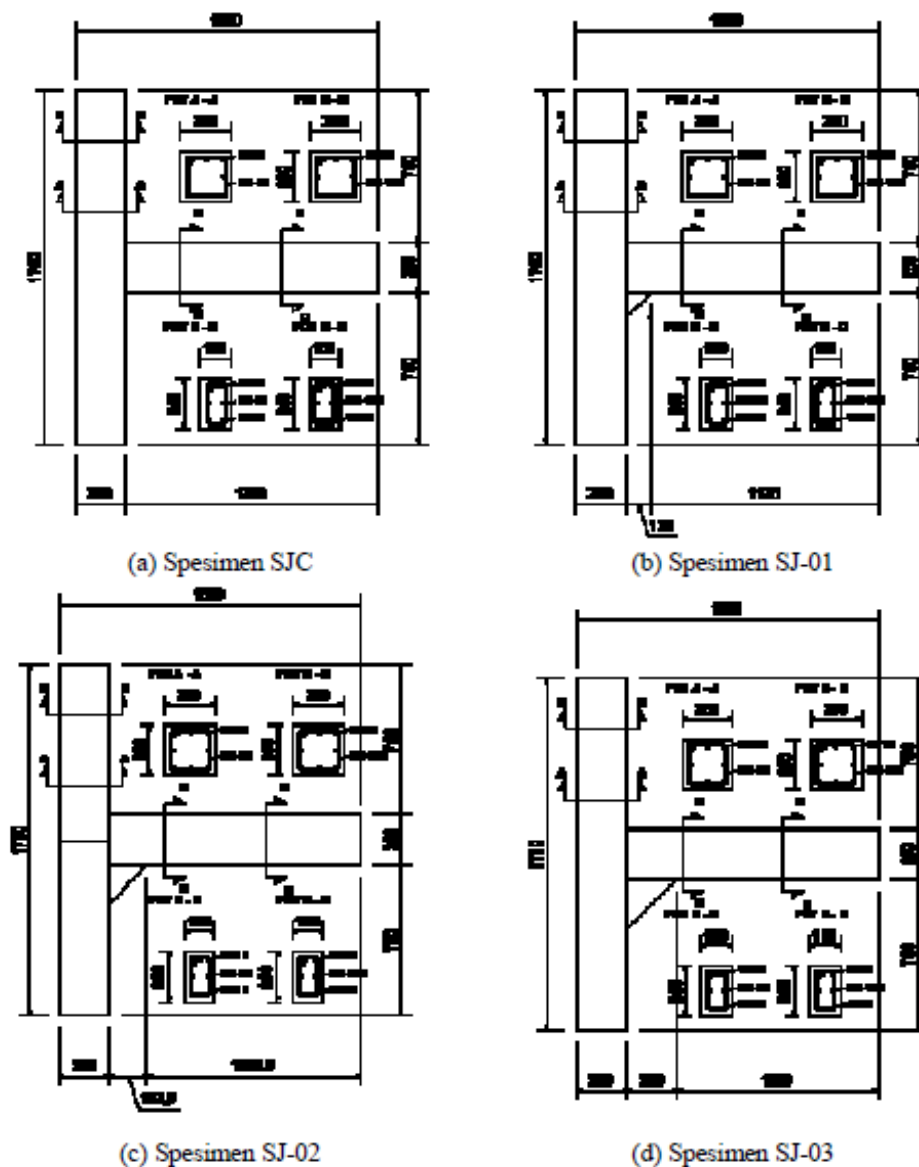
Loading frame berupa kerangka baja yang digunakan untuk menempatkan specimen dan aktuator agar memiliki posisi yang stabil pada saat pengujian. *Loading frame* berupa pelat-pelat baja yang dibuat sedemikian rupa sehingga menjadi tumpuan sendi dan rol bagi specimen, serta tumpuan jepit pada aktuator hidrolik. Sepatu dari pelat baja ditambahkan pada *loading frame* dengan tumpuan sendi untuk memasang specimen pada tumpuan.

Strain gauge berfungsi untuk mengukur regangan baja tulangan. Dalam satu specimen dipasang tiga buah *strain gauge*, yaitu pada tulangan longitudinal atas dan bawah balok, serta pada tulangan transversal balok pada daerah dekat sambungan. *Strain gauge* dipasang setelah tulangan dirangkai sebelum pengecoran beton. Namun demikian proses pengecoran dapat merusak *strain gauge*, sehingga

pengecoran dan pemadatan pada sekitar daerah pemasangan harus dilakukan dengan hati-hati.

Aktuator hidrolik digunakan untuk memberikan beban lateral tarik dan tekan pada balok. Sedangkan *load cell* digunakan untuk mengukur beban yang diberikan oleh

aktuator. *Jack* hidrolik digunakan untuk memberikan gaya aksial pada bagian atas kolom. *Jack* hidrolik dipasang pada *loading frame* dan menekan kolom sehingga memberi tumpuan rol pada ujung kolom.



Gambar 2. Benda uji

LVDT (*linear variable differential transducer*) digunakan untuk mengukur defleksi lateral balok. *Data logger* digunakan untuk membaca *load cell*, *strain gauge*, dan LVDT, sedangkan *notebook* digunakan untuk merekam dan menampilkan hasil pembacaan *data logger*, serta

mengendalikan proses perekaman data pengujian.

Pembuatan spesimen

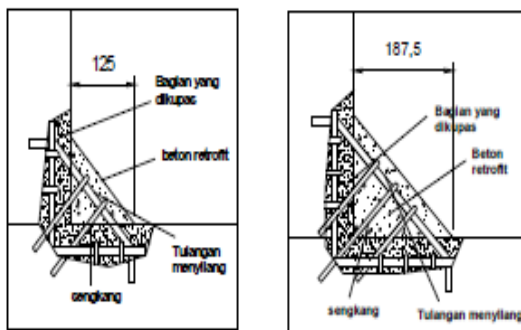
Campuran beton didesain menggunakan persyaratan SNI 2487:2013 untuk rangka pemikul momen. Formulasi

campuran diperhitungkan dengan SNI 03-2834-1993 setelah pengujian agregat halus dan agregat kasar. Pengadukan menggunakan molen di laboratorium, menghasilkan beton dengan nilai slump 40–75 mm, seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai slump beton

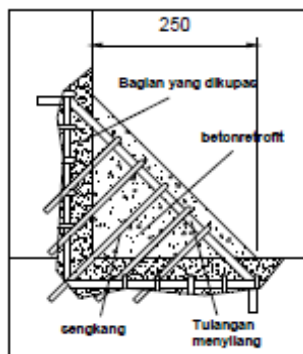
Campuran	Slump (mm)	Campuran	Slump (mm)
1	75	5	60
2	40	6	55
3	50	7	40
4	55	8	70

Kuat tekan silinder beton rata-rata sebesar 28,39 MPa, modulus elastisitas rata-rata $32,7 \times 10^3$ MPa, dan kuat tarik belah 3,05 MPa pada umur 28 hari.



(a) Spesimen SJ-01

(b) Spesimen SJ-02



(c) Spesimen SJ-03

Gambar 3. Penulangan perkuatan

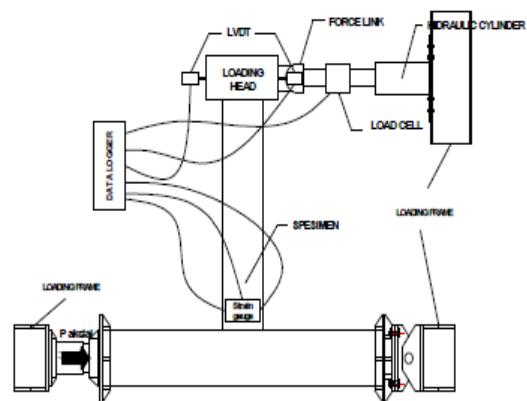
Setelah spesimen cukup umur, kekuatan dikerjakan dengan melakukan pengupasan selimut beton pada daerah sambungan yang akan diperkuat. Pengupasan sampai tulangan terlihat, kemudian tulangan ditambahkan dengan

membuat lubang pada kolom dan balok menggunakan mesin bor. Celah antara tulangan dan lubang diinjeksi dengan *epoxy adhesive*. Selanjutnya permukaan beton yang dikupas diolesi dengan perekat mortar dan beton penguat dicetak. Nilai slump beton penguat sebesar 40 mm.

Pengujian spesimen dilakukan setelah beton perkuatan melewati umur 28 hari. Gambar 2 menunjukkan bentuk spesimen, sedangkan Gambar 3 menunjukkan detail penulangan perkuatan spesimen.

Metode pengujian

Pengujian dilakukan dengan uji siklik, melalui pembebanan pada ujung kolom. Skema dan *setup* pengujian, susunan spesimen, beban dan alat ukur ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Skema pengujian

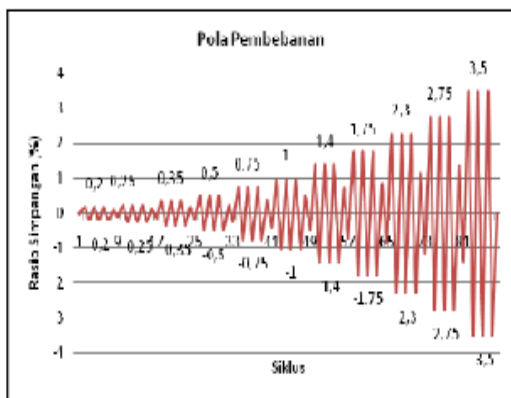


Gambar 5. Setup Pengujian

Beban aksial diberikan sebesar 7,67 ton yang mewakili beban gravitasi yang harus ditanggung spesimen pada bangunan

yang sesungguhnya. Beban tersebut diberikan pada kolom yang mewakili bagian atas pada bangunan.

Beban lateral diberikan oleh aktuator hidrolik yang dipasang pada ujung balok. Di tengahnya dipasang *load cell* untuk mengukur beban aktuator, yang selanjutnya dihubungkan dengan *data logger*.



Gambar 6. Pola pembebanan (SNI 7438-2012)

Pada ujung balok dipasang LVDT di kedua sisi untuk mengukur perpindahan lateral. Kedua LVDT dihubungkan juga ke data logger untuk pembacaan. *Strain gauge* yang ditanam dalam beton disambungkan juga ke *data logger* melalui sebuah *converter* untuk pembacaan hasil pengukuran.

Pembebanan dengan beban siklik, dikendalikan dengan *displacement control*, mengikuti kaidah dalam SNI 7438-2012. Pembebanan dilakukan dengan pola seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.

4. Hasil dan Pembahasan

Pola retak

Pada spesimen SJC yang tidak diperkuat, retak pertama berupa retak lentur yang terjadi di sisi samping balok, 18 cm dari sambungan yang tidak berlanjut pada siklus selanjutnya. Retak pada daerah sambungan muncul pada simpangan 0,2% siklus 3 (0,2%-3) pada sisi negatif menyambung ke sisi samping balok (Gambar 7a). Sampai akhir siklus sendi plastis terjadi pada daerah sambungan dan

daerah yang berjarak 40 cm di depan sambungan.

Pada spesimen SJ-01 yang diperkuat dengan ekspansi planar setengah tinggi balok, retak pertama muncul di ujung perkuatan, yang kemudian berlanjut ke sisi samping balok pada arah tegak lurus sumbu utama dan sisi atas balok. Retak ini kemudian berkembang menjadi sendi plastis. Sedangkan sendi plastis kedua juga terjadi pada daerah yang berjarak 40 cm di depan sambungan (Gambar 7b).

Pada spesimen SJ-02 retak pertama terjadi pada ujung perkuatan tegak lurus sumbu utama balok. Retakan tersebut ternyata tidak berlanjut, tetapi mengarah pada sisi yang sejajar sumbu utama di daerah perkuatan sekitar tulangan longitudinal. Kemudian menyambung ke kolom yang menyebabkan segitiga perkuatan terpisah dari spesimen. (Gambar 7c). Sendi plastis kedua terjadi pada daerah yang berjarak 50 cm di depan sambungan.

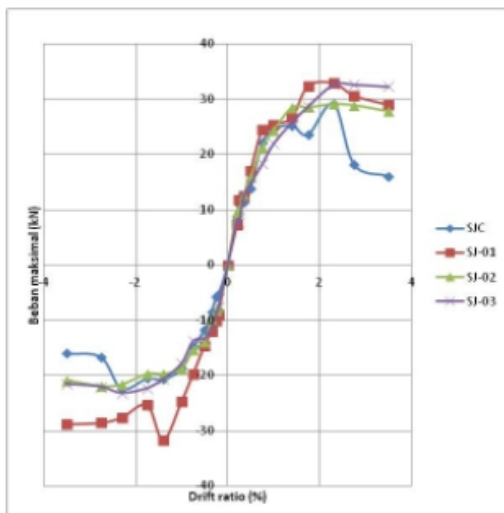
Pada spesimen SJ-03 pola retakan yang terjadi identik dengan spesimen SJ-03. Retak dimulai dari ujung perkuatan, tegak lurus sumbu utama balok yang kemudian tidak berlanjut, tetapi berpindah ke daerah sekeliling segitiga perkuatan. Sendi plastis kedua muncul pada daerah yang berjarak 50 cm di muka sambungan (Gambar 7d).

Kapasitas beban maksimal

Beban maksimal yang dicapai spesimen SJC 29,15 kN dan -22,53 kN pada simpangan 2,3%-1 pada arah positif dan negatif. Pada spesimen SJ-01 naik menjadi 32,87 kN pada simpangan 2,3%-1 arah positif dan -34,35 kN pada simpangan 1,4%-2 arah negatif. Spesimen SJ-02 menghasilkan beban maksimal yang lebih rendah, yaitu 29,06 kN pada simpangan 2,3%-1 positif dan -21,96 kN pada simpangan 1,75%-2 negatif. Sedangkan pada spesimen SJ-03 beban maksimal positif adalah 32,69 kN pada simpangan 2,3%-1 dan beban maksimal negatif 23,22 kN pada simpangan 2,3%-1. Kenaikan beban maksimal spesimen SJ-01 sebesar 12,74 dan spesimen SJ-03 sebesar 10,29% dibandingkan dengan spesimen tanpa perkuatan.



Gambar 7. Pengamatan retak



Gambar 8. Hubungan beban maksimal dan rasio simpangan

Beban maksimal rata-rata dari tiga siklus untuk semua spesimen ditunjukkan pada Gambar 8. Meskipun spesimen yang diperkuat SJ-02 memiliki beban maksimal yang lebih rendah dibandingkan yang tidak diperkuat, terlihat bahwa penurunan kekuatan setelah mencapai beban puncak lebih lambat.

Pada akhir siklus ketiga simpangan 3,5%, beban puncak pada spesimen SJC sebesar 70,2% dari beban maksimal pada arah negatif (-) dan 28,65% pada arah positif (+). Pada spesimen SJ-01 beban puncak pada siklus tersebut menjadi 78,22% (-) dan 46,72% (+), spesimen SJ-02 sebesar 65,93% (-) dan 80,89% (+), sedangkan pada spesimen SJ-03 sebesar 80,55% (-) dan 72,59% (+).

Kurva histerisis

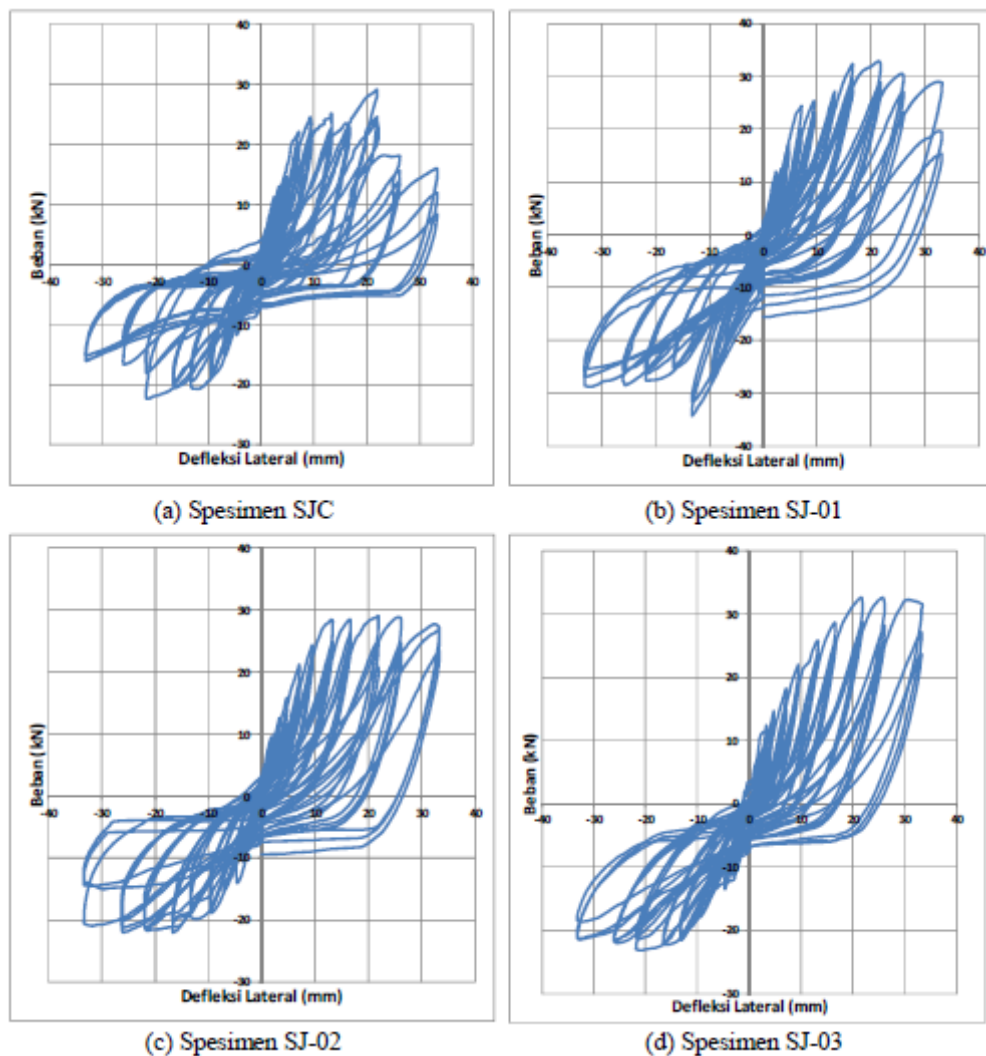
Kurva histerisis menunjukkan hubungan antara beban dan defleksi lateral. Pada spesimen SJC, tren kenaikan beban relatif cepat pada simpangan awal, tetapi setelah mencapai puncak turun juga dengan cepat (Gambar 9a). Pada spesimen SJ-01 penurunan beban setelah beban puncak terjadi lebih lambat (Gambar 9b). Hal yang sama terjadi pada spesimen SJ-02 dan SJ-03 (Gambar 9c dan Gambar 9d).

Disipasi energi

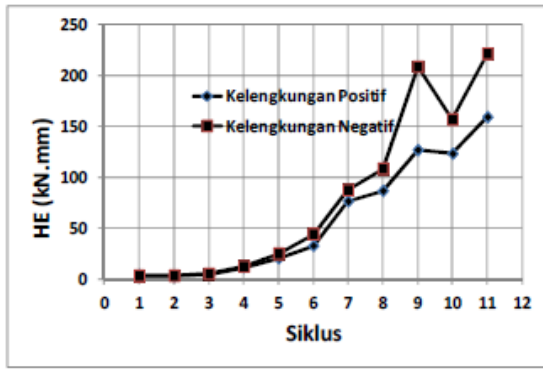
Energi histerisis spesimen SJC cenderung mengalami kenaikan mengikuti kenaikan simpangan, tetapi pada simpangan akhir mengalami penurunan dan kemudian naik lagi (Gambar 10a). Energi histerisis

terbesar 159,11 kN.mm pada rasio simpangan 3,5% positif dan 221,40 kN.mm pada simpangan 3,5% negatif.

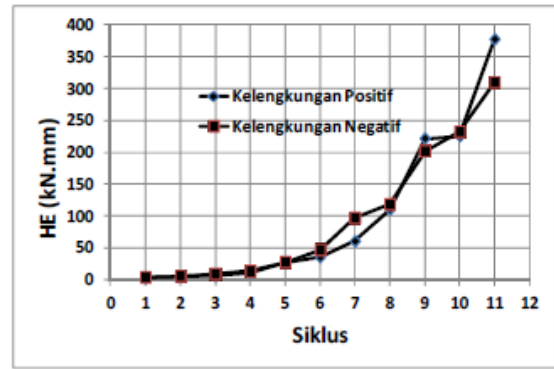
Gejala penurunan tidak terjadi pada spesimen SJ-01, namun kenaikan energy histerisis pada simpangan tersebut relatif kecil pada arah positif, sedangkan pada arah negatif tidak nampak gejala yang sama (Gambar 10b). Spesimen SJ-01 menunjukkan disipasi energi terbesar dibandingkan spesimen lainnya. Spesimen SJ-02 dan SJ-03 pada urutan selanjutnya (Lihat Gambar 10c dan Gambar 10d), sehingga semua spesimen yang diperkuat menghasilkan disipasi energi yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen yang tidak diperkuat.



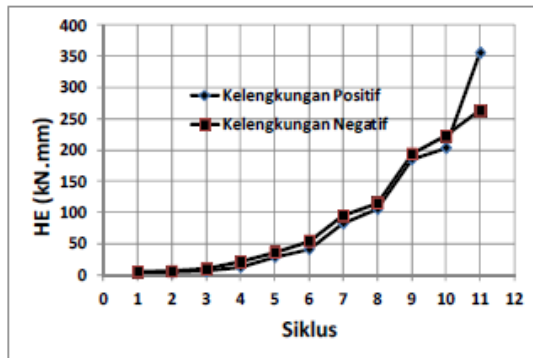
Gambar 9. Perbandingan kurva histerisis



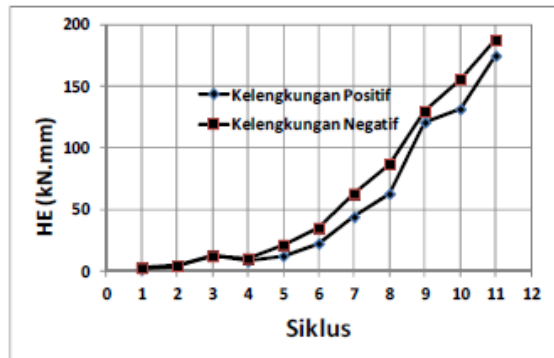
(a) Spesimen SJC



(b) Spesimen SJ-01

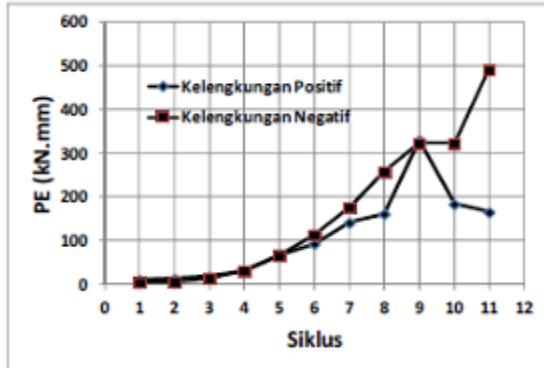


(c) Spesimen SJ-02

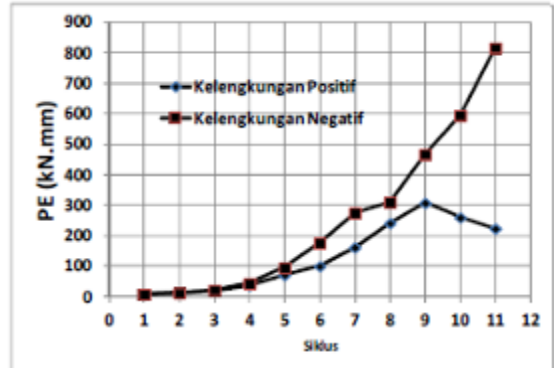


(d) Spesimen SJ-03

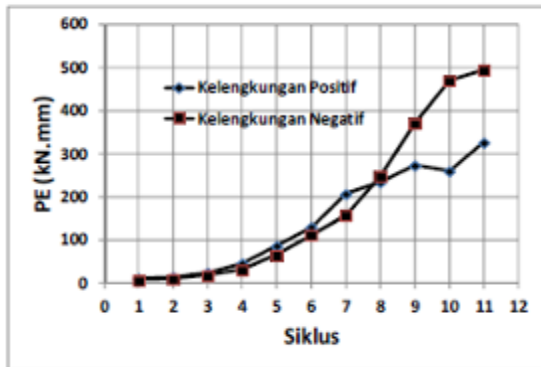
Gambar 10. Perbandingan energi histerisis



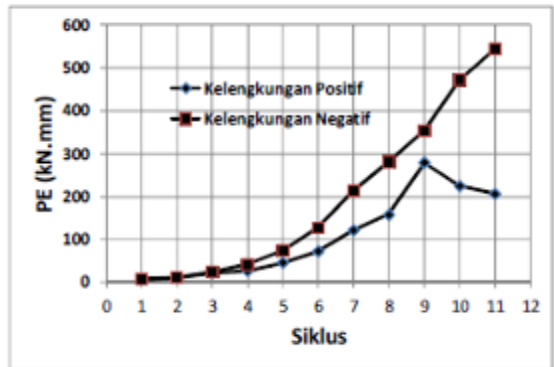
(a) Spesimen SJC



(b) Spesimen SJ-01



(c) Spesimen SJ-02



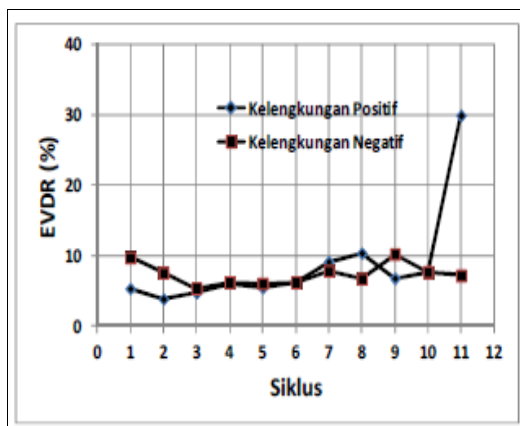
(d) Spesimen SJ-03

Gambar 11. Perbandingan energi potensial

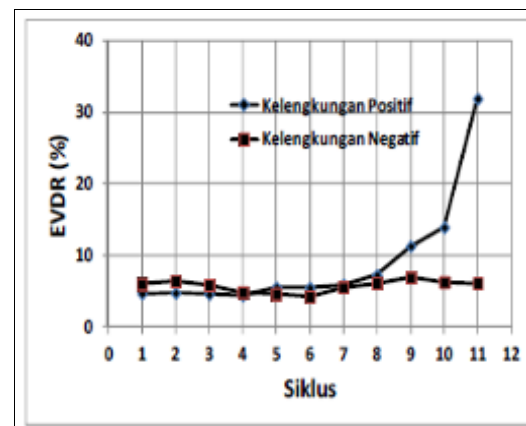
Kurva energi potensial cenderung naik mengikuti rasio simpangan seperti terlihat pada Gambar 11. Pada spesimen SJC dan SJ-01 terjadi kecenderungan penurunan nilai energi potensial pada rasio simpangan tinggi, yaitu 2,75% dan 3,5% arah positif. Pada spesimen SJ-02 setelah turun pada simpangan 2,75% positif, energi potensial naik lagi pada simpangan selanjutnya. Penurunan cenderung rendah jika ukuran kekuatan semakin besar, dan pada spesimen SJ-03 sudah tidak terjadi penurunan. Sedangkan pada arah negatif energi potensial selalu mengalami kenaikan pada semua spesimen. Pada arah positif energi potensial spesimen SJ-01 merupakan yang terbaik, dan spesimen kekuatan lainnya menunjukkan nilai energi potensial yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen tanpa kekuatan. Sementara pada arah negatif spesimen SJ-03 dan SJ-02 lebih baik dibandingkan dengan spesimen SJ-01 dan SJC.

Rasio redaman viskus ekuivalen (EVDR) pada spesimen SJC berfluktuasi antara 3,86% - 10,36% dengan lonjakan pada siklus terakhir, yaitu 29,91% seperti ditunjukkan pada Gambar 12a. Spesimen SJ-01 memiliki rentangan EVDR yang lebih pendek, antara 4,23% - 7,24%, sebelum terjadi lonjakan pada 3 rasio simpangan terakhir arah positif (Gambar 12b). EVDR maksimal 31,88% pada simpangan 3,5%, lebih rendah dibandingkan spesimen SJC.

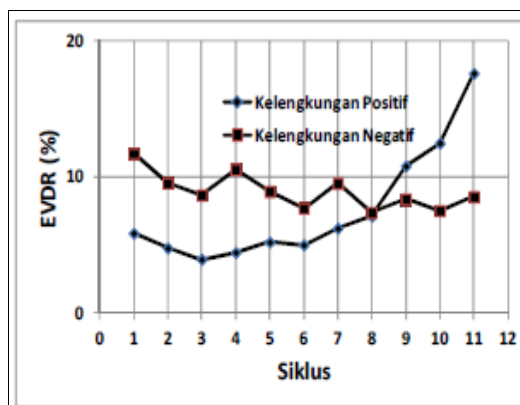
Grafik EVDR pada spesimen SJ-02 menunjukkan nilai yang berfluktuasi antara 3,95% - 12,49% sebelum terjadi lonjakan pada simpangan 3,5%, yaitu 17,61%, seperti terlihat pada Gambar 12c. Sementara pada spesimen SJ-03 nilai EVDR berfluktuasi antara 4,33% - 10,13% dengan lonjakan pada siklus terakhir arah positif 13,07%, yang terendah dibandingkan spesimen lainnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 12d.



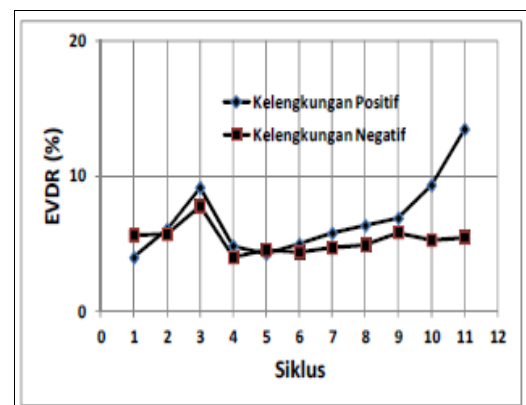
(a) Spesimen SJC



(b) Spesimen SJ-01



(c) Spesimen SJ-02



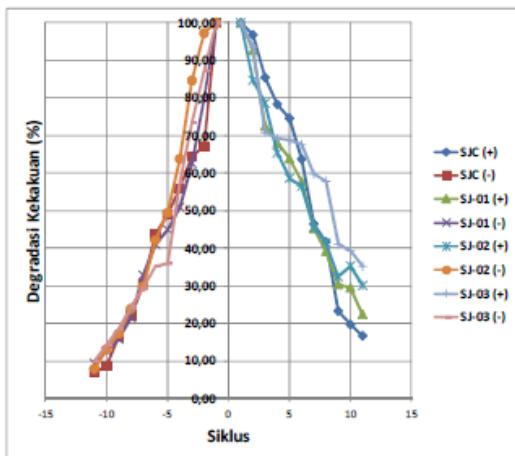
(d) Spesimen SJ-03

Gambar 12. Perbandingan rasio redaman viskus ekuivalen (EVDR)

Kekakuan siklus

Kekakuan awal spesimen tanpa perkuatan (SJC) sebesar 3,53 kN/mm pada arah positif dan 2,66 kN/mm pada arah negatif. Kekakuan awal spesimen SJ-01 lebih tinggi 35,41% pada arah positif dan 78,20% pada arah negatif. Kekakuan awal spesimen SJ-02 lebih tinggi 1,70% pada arah positif dan 48,50% pada arah negative dibandingkan spesimen SJC. Sedangkan kekakuan awal spesimen SJ-03 lebih tinggi 1,42% pada arah positif dan 22,93 pada arah negatif dibandingkan spesimen SJC.

Degradasi kekakuan spesimen SJC turun sampai 16,68% (+) dan 7,01% (-) pada akhir pengujian. Degradasi kekakuan spesimen SJ-01 turun sampai 22,43% (+) dan 9,36% (-), spesimen SJ-02 turun sampai 30,11% (+) dan 7,93% (-), sedangkan spesimen SJ-03 turun sampai 35,24% (+) dan 9,99% pada akhir pengujian. Perbandingan degradasi kekakuan ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan degradasi Kekakuan

Daktilitas

Daktilitas rata-rata spesimen SJC sebesar 3,6, spesimen SJ-01 sebesar 6,08, spesimen SJ-02 memiliki daktilitas terbaik yaitu 13,68, dan spesimen SJ-03 terbaik kedua sebesar 12,37, seperti ditunjukkan oleh Tabel 2. Kendala perhitungan daktilitas adalah pada pengujian spesimen SJ-01 belum runtuh pada arah negatif, spesimen SJ-02 belum runtuh pada arah positif, sedangkan spesimen SJ-03 belum runtuh pada arah positif dan negatif.

Tabel 2. Rekapitulasi perhitungan daktilitas

Parameter	Satuan	Spesimen			
		SJC	SJ-01	SJ-02	SJ-03
Positif (+)					
P_{peak}	kN	25,84	30,04	26,39	29,93
Δ_{peak}	mm	21,85	16,63	16,63	21,85
P_{ultim}	kN	20,67	24,03	21,11	23,94
Δ_u	mm	24,06	19,79	64,67	30,48
$0,4 P_{peak}$	kN	10,33	12,01	10,55	11,97
$\Delta_{0,4 P_{peak}}$	mm	2,27	3,38	2,84	3,66
R_e	N/mm	4555,91	3553,54	3721,07	3267,71
A	kN.mm	615,09	777,54	735,64	760,31
P_{inst}	kN	25,56	26,10	11,38	15,06
Δ_{inst}	mm	5,61	7,34	3,06	4,61
Daktilitas (μ)		4,29	4,06	21,16	10,95
Negatif (-)					
P_{peak}	kN	-19,38	-29,43	-21,44	-22,22
Δ_{peak}	mm	-21,85	-13,30	-21,85	-16,63
P_{ultim}	kN	-15,50	-23,54	-17,15	-17,77
Δ_u	mm	-25,00	-42,16	-32,62	-48,87
$0,4 P_{peak}$	kN	-7,75	-11,77	-8,58	-8,89
$\Delta_{0,4 P_{peak}}$	mm	-3,22	-3,32	-2,54	-2,72
R_e	N/mm	2406,48	3547,39	3371,01	3526,22
A	kN.mm	516,48	777,39	577,54	610,77
P_{inst}	kN	-20,66	-18,44	-17,71	-12,50
Δ_{inst}	mm	-8,59	-5,20	-5,25	-3,54
Daktilitas (μ)		2,91	8,11	6,21	13,79
Daktilitas rata-rata		3,60	6,08	13,68	12,37

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan:

1. Kegagalan struktur spesimen kontrol terjadi pada daerah sambungan, perkuatan beton ekspansi planar pada satu sisi sampai ukuran setengah tinggi akan memindahkan daerah kegagalan ke ujung perkuatan, sedangkan pada perkuatan yang lebih besar kegagalan terjadi pada elemen perkuatan yang terlepas dari struktur awal.
2. Kenaikan kekuatan maksimal secara signifikan terjadi pada spesimen dengan perkuatan setengah dan perkuatan penuh, masing-masing sebesar 12,74% dan 10,29%. Sedangkan perkuatan tiga perempat tidak menaikkan kekuatan maksimal.
3. Disipasi energi pada akhir pengujian spesimen perkuatan setengah memiliki nilai tertinggi, diikuti oleh spesimen perkuatan $\frac{3}{4}$ dan perkuatan penuh, lebih baik daripada spesimen tanpa perkuatan.
4. Spesimen perkuatan setengah memiliki energi potensial terbaik pada arah positif, sedangkan spesimen perkuatan penuh memiliki energi potensial terbaik pada arah negatif pada siklus awal. Sementara pada siklus stabil cenderung terjadi gejala penurunan energi potensial pada simpangan-simpangan akhir.

5. Rasio redaman viskus ekuivalen cenderung menurun mengikuti dimensi kekuatan.
6. Kekakuan siklus awal specimen *retrofit* meningkat sampai 35,41% dan 78,20% untuk specimen SJ-01, 1,70% dan 48,50% untuk specimen SJ-02, serta 1,42% dan 22,93% untuk specimen SJ-03. Degradasi kekakuan specimen *retrofit* juga mengalami pengurangan, dimana specimen dengan dimensi kekuatan semakin besar memiliki sifat yang semakin baik.
7. Perkuatan ekspansi planar segitiga meningkatkan daktilitas sambungan secara signifikan.
8. Perkuatan ekspansi planar mampu meningkatkan kekuatan sambungan sehingga memenuhi criteria penerimaan seperti disyaratkan dalam SNI 7438-2012.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala dan Staf Laboratorium Struktur dan Mekanika Bahan, Pusat Studi Ilmu Teknik (PSIT), Universitas Gadjah Mada serta kepada Kepala dan Staf Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta atas fasilitas yang diberikan untuk melakukan penelitian ini.

Daftar pustaka

- Alcocer, S.M., Jirsa, J.O., 1993, RC Frame Connection Rehabilitated by Jacketing, *ACI Structural Journal* 90(3), 195-208.
- Chaimahawan, P., Pimanmas, A., 2009, Seismic Retrofit of Substandar Beam-column Joint by Planar Joint Expansion, *Material and Structures* 42, 443-459.
- Gates, A.E., Ritchie, D., 2007, *Encyclopedia of Earthquake and Volcanoes*, 3rd ed, Fact on File Inc., New York.
- Ghobarah, A., Aziz, T.S., Biddah, A., 1997, Rehabilitation of Reinforced Concrete Frame Connection Using Corrugated Steel Jacketing, *ACI Structural Journal* 94-S26, 283-294.
- Hakuto, S., Park, R., Tanaka, H., 2000, Seismic Load Tests on Interior and Exterior Beam-Column Joints with Substandars Reinforcing Details, *ACI Structural Journal*, 97-S2, 11-25.
- Irsyam, M., Sengara, I.W., Aldiamar, F., Widyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D.H., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., Ridwan, M., 2010, *Peta Hazard Gempa Indonesia 2010 sebagai Acuan Dasar Perencanaan dan Perancangan Infrastruktur Tahan Gempa*, Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Misir, I.S., Kahraman, S., 2013, Strengthening of Non-seismically Detailed Reinforced Concrete Beam column Joint Using SIFCON Blocks, *Sadhana* vol. 38, 69-88
- Park, R., Paulay, T., 1975, *Reinforced Concrete Structure*, John Wiley & Sons, New York.
- SNI 03-2487-2002, *Tata Cara Perhitungan Beton Untuk Bangunan gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- SNI 03-2487-2013, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- SNI 03-2834-1993, *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta
- SNI 15-2049-2004, *Semen Portland*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta
- SNI 7438-2012, *Metode Uji dan Kriteria Penerimaan Sistem Struktur Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang Pracetak Untuk Bangunan gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta
- Sulendra, I.K., 2005, Kerusakan Akibat Gempa dan Metode Perbaikan Elemen Struktur Pasca Gempa, *Jurnal SMARTek* vol.3 No. 1, 12-20.
- Supaviriyakit, T., Pimanmas, A., 2008, Comparative Performance of Sub standard Interior Reinforced Concrete Beam-Column Connection with Various Joint Reinforcing Details, *Material and Structures* 41, 543-557.