



Metode Retrofit Tulangan Baja Eksternal untuk Peningkatan Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang¹

Retrofitting and Ductility of Reinforced Concrete Beams Using an External Reinforcement Method

Novita Ike Triyuliani^a, Sri Murni Dewi^{b, 2}, Lilya Susanti^b

^a Program Studi S2 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Jl. MT Haryono No. 167 Malang

^b Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Jl. MT Haryono No. 167 Malang

ABSTRACT

The innovations strengthening building structures are important topics. Failure in structures such as beams and columns due to time, re-functions of a building, even initial design errors that are weak or lack the safety factor of a building structure. External reinforced concrete beams are one of the beams currently being developed. It is a concrete block with reinforcement of steel reinforcement on the outer (external) of the beam. This study aims to determine the index of increasing beam strength and ductility after retrofitting external steel reinforcement, which has the dimension of beams 15 x 15 x 100 cm, repeating 12 pcs, with external reinforcement each 6 pcs 2Ø6 and 3Ø6. The results from this study are an increasing the index of beam flexural strength after retrofit with external steel reinforcement. Meanwhile, beams after retrofit with 2Ø6 external steel have an average increase index of 1.25 and 1.21 while for external steel 3Ø6 are 1.29 and 1.60 respectively. The ductility depends on the value of ultimate load and maximum deflection that occurs, where the ductility value for the comparison of each specimen experiences a reduction in the average ductility value with 2Ø6 external steel which is 37.74% and 70.95% while with 3Ø6 external steel is 61,65% and 60.62%.

Keywords: external steel reinforcement, ductility, ultimate load, deflection

ABSTRAK

Berbagai inovasi upaya peningkatan kekuatan struktur bangunan telah menjadi bahasan yang penting. Kegagalan pada struktur seperti balok dan kolom karena umur, alih fungsi suatu bangunan, bahkan kesalahan desain awal yang lemah atau kurang memenuhi faktor keamanan suatu struktur bangunan. Balok beton bertulangan eksternal adalah salah satu balok yang sedang dikembangkan pada saat ini, yaitu balok beton dengan perkuatan tulangan baja di sisi terluar (eksternal). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui indeks peningkatan kekuatan balok dan daktilitas setelah dilakukan perbaikan menggunakan tulangan baja eksternal, dengan dimensi balok 15 × 15 × 100 cm berulang 12 buah, penambahan tulangan baja eksternal masing-masing 6 buah 2Ø6 dan 3Ø6. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah indeks peningkatan kekuatan lentur balok setelah dilakukan perbaikan menggunakan tulangan baja eksternal. Dimana balok setelah dilakukan perbaikan dengan baja eksternal 2Ø6 memiliki indeks peningkatan rata-rata 1,25 dan 1,21 sedangkan untuk baja eksternal 3Ø6 masing-masing 1,29 dan 1,60. Daktilitas tergantung dari nilai beban ultimit dan lendutan maksimum yang terjadi, dimana nilai daktilitas untuk perbandingan tiap benda uji mengalami reduksi nilai daktilitas rata-rata dengan baja eksternal 2Ø6 yaitu sebesar 37,74% dan 70,95% sedangkan dengan baja eksternal 3Ø6 sebesar 61,65% dan 60,62%.

Kata kunci: tulangan baja eksternal, daktilitas, beban ultimit, lendutan

¹ Info artikel: Received 2 Mei 2019, Received in revised from 2 Mei 2019, Accepted 3 September 2019.

² Corresponding author: srilmurnid@ub.ac.id (S. M. Dewi)

PENDAHULUAN

Beton bertulang adalah suatu kombinasi antara beton dan baja tulangan yang berfungsi sebagai perkuatan pada serat/bagian tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Salah satu elemen struktur pada bangunan adalah balok beton (McComac, 2003 dalam Susanto, tanpa tahun). Balok beton sebagai elemen struktur dirancang untuk menahan beban yang tegak lurus sumbuinya (Vis dan Gideon, 1997 dalam Susanto, tanpa tahun). Peningkatan kekuatan struktur bangunan telah menjadi bahasan yang penting akhir-akhir ini. Alih fungsi suatu bangunan, kegagalan pada struktur seperti balok dan kolom karena umur, lingkungan yang mempengaruhi penurunan kekuatan struktur bahkan kesalahan desain awal yang lemah atau kurang maupun akibat kejadian-kejadian alam seperti gempa.

Inovasi perbaikan dan perkuatan struktur saat ini sudah banyak dikembangkan untuk mengurangi biaya, waktu, dan sumber daya alam. Perbaikan struktur bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana. Perkuatan struktur bertujuan untuk menambah faktor keamanan akibat perubahan fungsi atau peningkatan beban rencana.

Dalam penelitian Susanto dkk, “Balok Beton Bertulangan Eksternal” yang menggunakan Baja *Lips Channel* sebagai perkuatan. Hasil penelitian menunjukkan setelah diperkuat dengan baja *Lips Channel* mengalami peningkatan kekuatan. Hasil penelitian metode lain mengenai retrofit, dalam penelitian Kothandaraman dkk. (dalam Zhang., 2012), teknik retrofit balok RC dengan penguatan eksternal pada tingkat *soffit*. Metode retrofit ini efektif biaya, dan mudah diaplikasikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *retrofitting* tulangan eksternal pada tingkat *soffit* dengan cara ini secara signifikan mengurangi lebar retakan, defleksi, dan kapasitas momen meningkat dibandingkan dengan tanpa *retrofit*.

Berangkat dari kesemua hal tersebut, penulis melakukan eksperimen perbaikan kekuatan balok menggunakan baja eksternal, dimana pemasangan tulangan baja di sisi terluar (eksternal) bagian penampang tarik balok. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui indeks peningkatan kekuatan balok dan daktilitas setelah dilakukan perbaikan menggunakan tulangan baja eksternal.

TINJAUAN PUSTAKA

Perbaikan (*Retrofit*)

Perbaikan atau retrofitting struktur secara umum dapat diartikan sebagai penambahan komponen-komponen struktur baru kepada sistem yang lama sehingga terjadi peningkatan kinerja struktur. Konteks retrofitting dapat pula didefinisikan sebagai perbaikan struktur terkait dengan kemampuan aktual di dalam operasional struktur (Apriani, 2012). Namun, terkadang dalam perbaikan terdapat pilihan lebih dari satu material yang dapat digunakan dengan hasil yang sama, jika ini terjadi maka pilihan terakhir terhadap material atau kombinasi material mesti dilakukan dengan mempertimbangkan kemudahan, penerapan biaya, ketersediaan keterampilan buruh dan peralatan. Pada umumnya tiga hal harus diperhitungkan dalam mempertimbangkan pemilihan material yang akan digunakan: kondisi perbaikan, sifat-sifat material perbaikan, dan keterampilan serta peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan perbaikan (Isneini, 2009). Pemilihan material baja tulangan sebagai perkuatan adalah salah satu alasan mudah didapat serta penerapan yang efisien waktu dan biaya.

Beton Bertulang

Beton bertulang didefinisikan sebagai beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja (SNI 03-2847-2002).

Kuat Tekan Beton

Berdasarkan SNI 03-1974-1990, kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan dihitung dengan Persamaan 1.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan f_c' = kuat tekan beton (MPa), P = beban maksimum (N), A = luas penampang benda uji (mm^2).

Kuat Tarik Baja

Tujuan pengujian kuat tarik baja berdasarkan SNI 07-2529-1991 adalah untuk mendapatkan nilai kuat tarik baja dan parameter lainnya yang dapat digunakan untuk pengendalian mutu baja. Tegangan leleh baja dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$f_y = \frac{P_y}{A_s} \quad (2)$$

dengan f_y = tegangan leleh baja (MPa), P_y = beban leleh (N), A_s = luas penampang baja (mm^2)

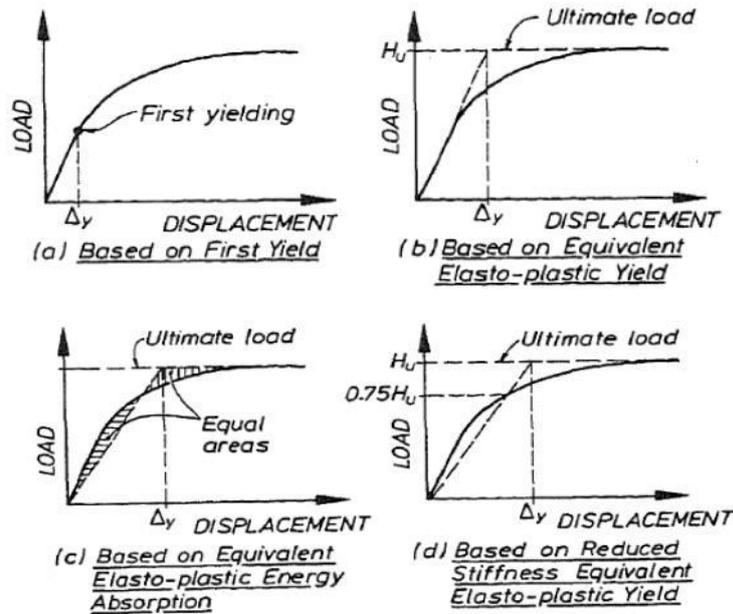
Daktilitas

Menurut Siti Nurlina dkk. (Tanpa Tahun), daktilitas adalah aspek penting dalam perencanaan suatu elemen struktur disamping aspek kekuatan dan kekakuan. Ketika terjadi gempa, dimana elemen-elemen struktur yang mempunyai daktilitas besar akan menyerap energi lebih banyak dibandingkan dengan elemen-elemen struktur dengan daktilitas kecil atau getas. Daktilitas pada balok yaitu perbandingan suatu parameter deformasi struktur pada saat runtuh terhadap parameter deformasi pada saat tulangan tarik terluar penampang mengalami leleh pertama, atau dengan kata lain kemampuan balok untuk berdeformasi pada masa inelastis. Daktilitas dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3)$$

dengan μ = daktilitas, Δu = lendutan maksimum (mm), Δy = lendutan leleh pertama (mm)

Lendutan ultimit didapatkan dari hasil pengujian balok beton bertulang pada saat balok mengalami beban maksimum (balok runtuh). Menurut Park (dalam Ruth dkk. Tanpa Tahun), terdapat alternatif pengambilan lendutan pada titik leleh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Beberapa alternatif pengambilan lendutan pada titik leleh
 (Sumber: Park, 1998 dalam Ruth dkk. Tanpa Tahun)

Pada penelitian ini digunakan alternatif pengambilan lendutan pada titik leleh bagian (d) dari Gambar 1 dengan dapat diambil dari titik potong beban, dimana untuk beban diambil 75% dari beban ultimit.

Indeks Peningkatan Kekuatan Lentur pada Balok

Angka indeks atau sering disebut indeks, pada dasarnya merupakan suatu angka yang dibuat sedemikian rupa sehingga dapat dipergunakan untuk melakukan perbandingan antar variabel (<https://www.academia.edu>). Sedangkan indeks peningkatan kekuatan balok yang dimaksud adalah perbandingan kekuatan aktual sebelum *retrofit* dan kekuatan lentur aktual balok beton bertulang setelah *retrofit*, dan nilai yang diharapkan adalah > 1, sehingga diperoleh Persamaan 4.

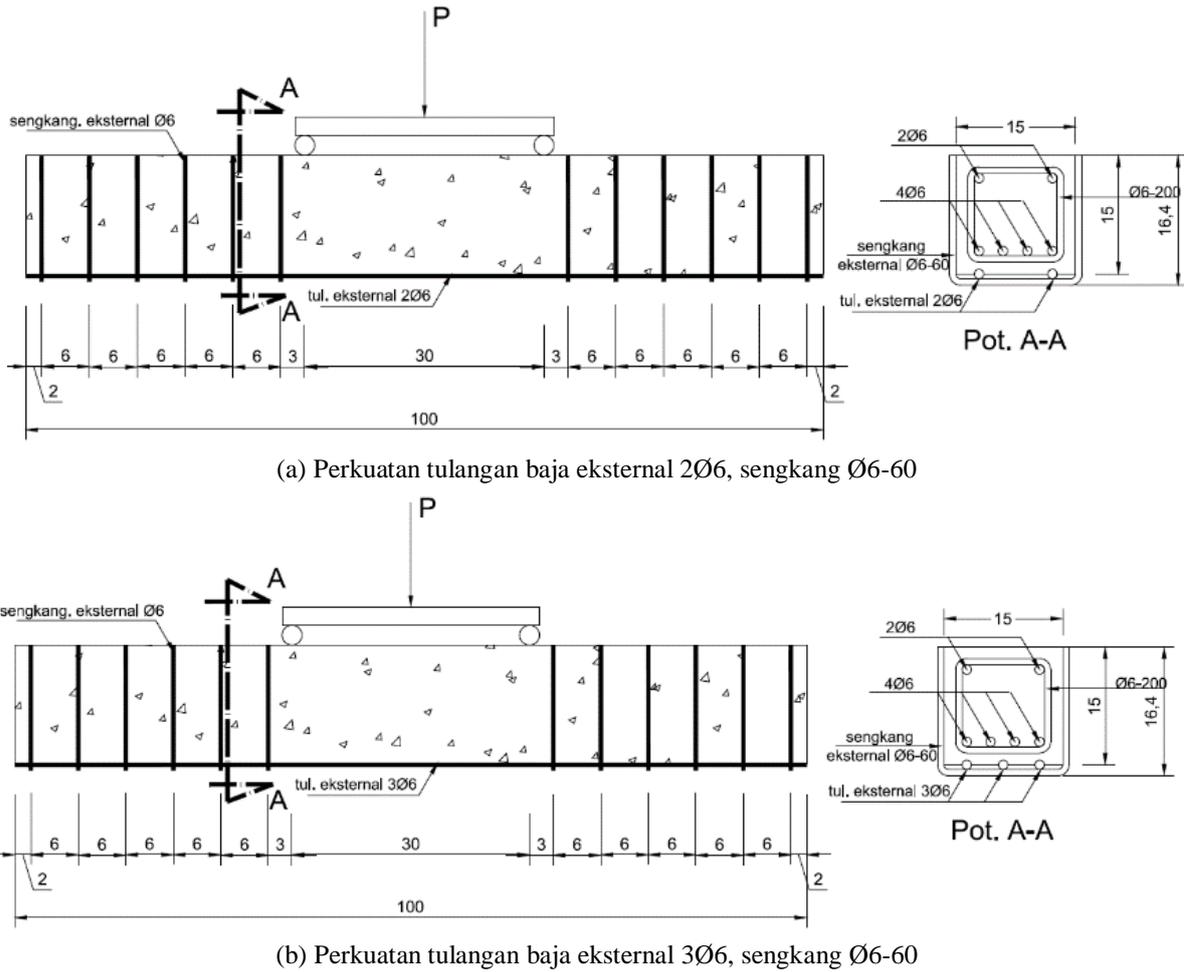
$$I = \frac{P_{ur}}{P_u} \tag{4}$$

dengan I = indeks peningkatan, P_{ur} = beban ultimit benda uji setelah *retrofit*, P_u = beban ultimit benda uji sebelum *retrofit*

METODE PENELITIAN

Perencanaan Benda Uji

Benda uji untuk balok beton bertulang menggunakan ukuran $15 \times 15 \times 100$ cm, sedangkan untuk balok benda uji setelah di-*retrofit* tetap dengan ukuran $15 \times 15 \times 100$ cm ditambah tulangan baja eksternal dan sengkang eksternal di bagian sisi bawah dan samping balok, masing-masing sengkang kanan-kiri 6 buah sengkang. Detail benda uji yang akan dibuat pada penelitian dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 (a) Benda uji Tipe B1 dan (b) benda uji Tipe B2

Variasi Benda Uji

Balok yang akan di-retrofit adalah balok yang sudah dilakukan pengujian sebelumnya hingga runtuh dan beban mencapai beban ultimit. Sebelum dilakukan *grouting*, terlebih dahulu balok dikembalikan dalam kondisi nol defleksi, kemudian dilakukan *grouting* dan dipasang tulangan baja eksternal di bagian lentur, sengkang eksternal sebagai penahan geser. Karena dalam penelitian ini diharapkan terjadi runtuh lentur terlebih dahulu, sehingga balok direncanakan sedemikian rupa agar terjadi gagal lentur ultimit tanpa didahului gagal geser. Variasi kode benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Jumlah dan variasi benda uji beton

| MODEL A (Benda Uji Balok 15x15x100cm sebelum retrofit) | | | |
|--|---------------|---|----------------|
| No. | Kode | Nama Benda Uji | Jml. Benda Uji |
| 1 | A1B1C2D1 | Balok beton normal (4Ø6, sengkang Ø6-200) | 3 Buah |
| 2 | A1B1C2D1 (FA) | Balok beton normal + fly ash 20% (4Ø6, sengkang Ø6-200) | 3 Buah |
| 3 | A3B1C2D1 | Balok beton slag 40% (4Ø6, sengkang Ø6-200) | 3 Buah |
| 4 | A3B1C2D1 (FA) | Balok beton slag 40% + fly ash 20% (4Ø6, sengkang Ø6-200) | 3 Buah |

| MODEL B (Benda Uji Balok 15x15x100cm setelah retrofit) | | | |
|--|----|--|--------|
| 1 | B1 | Balok dengan perkuatan tulangan baja eksternal (2Ø6, sengkang Ø6-60) | 6 Buah |
| 2 | B2 | Balok dengan perkuatan tulangan baja eksternal (3Ø6, sengkang Ø6-60) | 6 Buah |

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Lentur Balok Sederhana

Pengujian lentur balok beton digunakan untuk mengetahui kuat lentur maksimum balok beton bertulang, antara sebelum dan setelah di-retrofit menggunakan tulangan baja eksternal. Untuk pengujian lentur balok beton bertulang sebelum di-retrofit, sebelumnya sudah dilakukan pengujian oleh orang yang berbeda. Sehingga dalam penelitian ini dilanjutkan eksperimen balok beton bertulang setelah diperbaiki menggunakan tulangan baja eksternal. Jumlah benda uji yang dibuat sebanyak 12 buah, dengan rincian 6 buah dibuat penambahan tulangan 2Ø6 (B1), 6 buah dibuat penambahan tulangan 3Ø6 (B2). Detail benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Balok retrofit dengan penambahan tulangan eksternal 2Ø6 dan Balok retrofit dengan penambahan tulangan eksternal 3Ø6 (sengkang eksternal Ø6-60)

Indeks Peningkatan Kekuatan Lentur pada Balok

Indeks peningkatan kekuatan yang dimaksud adalah perbandingan beban ultimit balok antara sebelum dan setelah dilakukan retrofit, dalam perhitungan nilai tersebut dibandingkan satu per satu hasil pengujian dari masing-masing variasi. Dari hasil eksperimen diperoleh indeks peningkatan seperti yang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Indeks peningkatan untuk variasi balok antara sebelum dan setelah di-*retrofit*

| No. | Kode Benda Uji | Pu (kg) | Index Peningkatan Pu (I) | Rata-rata (I) |
|-----|----------------|---------|--------------------------|---------------|
| 1 | A1B1C2D1 (1) | 4201,5 | 1,45 | 1,25 |
| 2 | B1 (1) | 6086 | | |
| 3 | A1B1C2D1 (2) | 4044 | 1,09 | |
| 4 | B1 (2) | 4400 | | |
| 5 | A1B1C2D1 (3) | 4830 | 1,22 | |
| 6 | B1 (3) | 5912 | | |
| 7 | A3B1C2D1 (1) | 4728 | 1,06 | 1,29 |
| 8 | B2 (1) | 5012 | | |
| 9 | A3B1C2D1 (2) | 4632 | 1,09 | |
| 10 | B2 (2) | 5068 | | |
| 11 | A3B1C2D1 (3) | 4976 | 1,71 | |
| 12 | B2 (3) | 8504 | | |
| 13 | A1B1C2D1 FA(1) | 5000 | 1,26 | 1,21 |
| 14 | B1 (4) | 6306 | | |
| 15 | A1B1C2D1 FA(2) | 5200 | 1,02 | |
| 16 | B1 (5) | 5302 | | |
| 17 | A1B1C2D1 FA(3) | 4800 | 1,33 | |
| 18 | B1 (6) | 6406 | | |
| 19 | A3B1C2D1 FA(1) | 5000 | 1,56 | 1,60 |
| 20 | B2 (4) | 7804 | | |
| 21 | A3B1C2D1 FA(2) | 4800 | 1,57 | |
| 22 | B2 (5) | 7536 | | |
| 23 | A3B1C2D1 FA(3) | 4600 | 1,68 | |
| 24 | B2 (6) | 7712 | | |

Dari hasil eksperimen di atas menunjukkan bahwa beban lentur maksimum yang mampu ditahan oleh balok yang dilakukan perbaikan dengan tulangan baja eksternal 2Ø6 dan 2Ø6 meningkat secara signifikan, berturut-turut dengan indeks peningkatan 1,25; 1,29; 1,21; dan 1,60. Hal ini dikarenakan dengan penambahan tulangan eksternal, maka momen nominal yang mampu ditahan oleh balok juga semakin besar, dan beban lentur maksimum yang mampu ditahan oleh balok juga semakin meningkat.

Daktilitas pada Balok

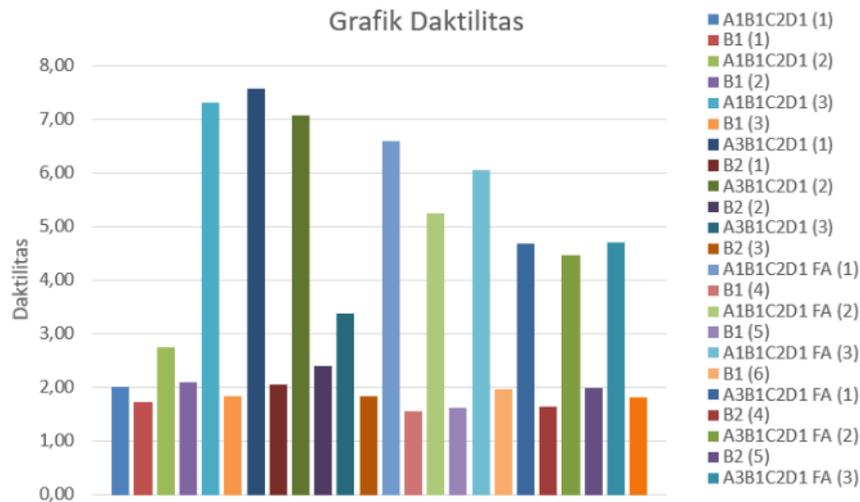
Dari hasil kurva hubungan beban dan lendutan juga akan diperoleh perhitungan daktilitas yang terjadi eksperimen balok sebelum dan setelah di-*retrofit*. Besarnya nilai daktilitas berdasarkan perbandingan antara lendutan maksimum (Δu) dengan lendutan leleh pertama (Δu). Hasil perhitungan nilai daktilitas ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Daktilitas untuk variasi balok antara sebelum dan setelah diretrofit

| No. | Kode Benda Uji | Δu (mm) | Δy (mm) | Daktilitas $M = (\Delta u / \Delta y)$ | Reduksi M % | Reduksi M Rata-Rata % |
|-----|----------------|--------------------|--------------------|---|----------------|--------------------------|
| 1 | A1B1C2D1 (1) | 7,05 | 3,5 | 2,01 | 14,57 | 37,74 |
| 2 | B1 (1) | 8,09 | 4,7 | 1,72 | | |
| 3 | A1B1C2D1 (2) | 10,86 | 3,95 | 2,75 | 23,83 | |
| 4 | B1 (2) | 9,22 | 4,4 | 2,09 | | |
| 5 | A1B1C2D1 (3) | 30,73 | 4,2 | 7,32 | 74,82 | |
| 6 | B1 (3) | 9,67 | 5,25 | 1,84 | | |
| 7 | A3B1C2D1 (1) | 24,96 | 3,3 | 7,56 | 72,85 | 61,56 |
| 8 | B2 (1) | 6,367 | 3,1 | 2,05 | | |
| 9 | A3B1C2D1 (2) | 28,25 | 4 | 7,06 | 65,92 | |
| 10 | B2 (2) | 11,79 | 4,9 | 2,41 | | |
| 11 | A3B1C2D1 (3) | 12,67 | 3,75 | 3,38 | 45,90 | |
| 12 | B2 (3) | 8,408 | 4,6 | 1,83 | | |
| 13 | A1B1C2D1 FA(1) | 31,63 | 4,8 | 6,59 | 76,54 | 70,95 |
| 14 | B1 (4) | 7,96 | 5,15 | 1,55 | | |
| 15 | A1B1C2D1 FA(2) | 39,83 | 7,6 | 5,24 | 68,94 | |
| 16 | B1 (5) | 6,84 | 4,2 | 1,63 | | |
| 17 | A1B1C2D1 FA(3) | 33,24 | 5,5 | 6,04 | 67,37 | |
| 18 | B1 (6) | 7,889 | 4 | 1,97 | | |
| 19 | A3B1C2D1 FA(1) | 30,48 | 6,5 | 4,69 | 64,97 | 60,62 |
| 20 | B2 (4) | 7,803 | 4,75 | 1,64 | | |
| 21 | A3B1C2D1 FA(2) | 22,32 | 5 | 4,46 | 55,55 | |
| 22 | B2 (5) | 10,91 | 5,5 | 1,98 | | |
| 23 | A3B1C2D1 FA(3) | 23,55 | 5 | 4,71 | 61,35 | |
| 24 | B2 (6) | 9,01 | 4,95 | 1,82 | | |

Grafik perbandingan daktilitas untuk masing-masing variasi benda uji antara sebelum dan setelah di-*retrofit*, lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat bahwa terdapat reduksi daktilitas jika dibandingkan antara balok sebelum dan setelah di-*retrofit* menggunakan tulangan baja eksternal. Penurunan nilai daktilitas diakibatkan karena penambahan tulangan eksternal, karena sifat dari penambahan tulangan tersebut sehingga mendekati sifat *over reinforced*, jadi semakin bertambahnya tulangan berbanding terbalik dengan penurunan nilai daktilitas (Park dan Paulay, 1974)



Gambar 4 Perbandingan daktilitas balok untuk masing-masing variasi (sebelum dan setelah *retrofit*)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban lentur maksimum yang mampu ditahan oleh balok yang dilakukan perbaikan dengan tulangan baja eksternal 2Ø6 dan 2Ø6 meningkat secara signifikan, berturut dengan indeks peningkatan 1,25; 1,29; 1,21; dan 1,60. Hal ini dikarenakan dengan penambahan tulangan eksternal, maka momen nominal yang mampu ditahan oleh balok juga semakin besar, dan beban lentur maksimum yang mampu ditahan oleh balok juga semakin meningkat.
2. Nilai daktilitas mengalami reduksi jika dibandingkan antara balok sebelum dan setelah di-*retrofit* menggunakan tulangan baja eksternal. Meskipun dilihat dari beban ultimit mengalami peningkatan, namun di sisi lain, balok yang sudah dilakukan perbaikan mengalami penurunan nilai daktilitas. Karena sifat dari penambahan tulangan tersebut sehingga mendekati sifat *over reinforced*, jadi semakin bertambahnya tulangan berbanding terbalik dengan penurunan nilai daktilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, Widya. 2013. Analisis Buckling Restrained Braces System sebagai Retrofitting pada Bangunan Beton Bertulang Akibat Gempa Kuat. *Jurnal Sains dan Teknologi* Vol. 12 No. 2, September, 2013. Depok: Universitas Indonesia.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. *SNI 03-2847-2002 (Tata Cara Perhitungan Struktur Beton. Untuk Bangunan Gedung)*. Jakarta: BSN.
- https://www.academia.edu/5848224/ANGKA_INDEKS_DAN_PERAMALAN, diakses Pada Tanggal 26 November 2018, Pukul 20.23
- Mohd Isneini, 2009. Kerusakan dan Perkuatan Struktur Beton Bertulang. *Jurnal Rekayasa* Vol. 13 No. 3, Desember 2009. Lampung.
- Nurlina, S, et al. Tanpa Tahun. Perbandingan Daktilitas Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Perkuatan *CFRP* dan *GFRP*. Malang: Universitas Brawijaya.

- Park and Paulay, 1974, *Reinforced Concrete Structures*, New Zealand: Departement of Civil, University of Canterbury.
- Puslitbang Jalan dan Jembatan. 1990. *SNI 03–1974-1990 Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Puslitbang Jalan dan Jembatan. 1991. *SNI 07–2529-1991 Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Ruth, N, dkk. Tanpa Tahun. *Pengaruh Rasio Tulangan Longitudinal dari Metode Beton Bertulangan Bambu dengan Sengkang Baja pada Kolom Beton*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Susanto, S. dan Widjaya, A. Tanpa Tahun. *Balok Beton Bertulangan Eksternal*. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
- Zhang, Y. 2012. *Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Beams*. Thesis. USA: The Ohio State University.