

Pengaruh Penambahan Tulangan Vertikal Pada Perkuatan Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan Metode *Deep Embedment*

Ilham Akbar¹⁾, Ridwan²⁾, Muhammad Ikhsan³⁾

^{1, 2, 3)}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Riau

Email: ilham.akbar@student.unri.ac.id¹⁾, ridwan@eng.unri.ac.id²⁾,
muhammadikhsan@hotmail.com³⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v13i2.960>

(Received: 08 May 2023 / Revised: 14 August 2023 / Accepted: 01 September 2023)

Abstrak

Kapasitas beban struktur beton bertulang eksisting seringkali tidak mencukupi untuk memenuhi standar saat ini. Hal ini dikarenakan peningkatan kebutuhan beban dan degradasi material beton serta korosi tulangan akibat kondisi lingkungan. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan pengaruh penambahan tulangan vertikal pada perkuatan beton bertulang dengan menggunakan metode *deep embedment* (DE). Dalam penelitian ini dipersiapkan tiga buah benda uji balok beton bertulang, yaitu Balok-CS, Balok-D8, dan Balok-D12. Ketiga benda uji mempunyai ukuran penampang 150 mm x 200 mm dan panjang bentang 1400 mm. Ada dua ukuran tulangan yang digunakan sebagai tulangan perkuatan DE, yaitu tulangan diameter 8 mm dan 12 mm. Pengujian Balok-CS dibebani sampai runtuh, sementara Balok-D8 dan Balok-D12 dibebani 2 kali. Pembebanan pertama dilakukan sampai balok tersebut mengalami retak pertama dan pembebanan ke dua dilakukan sampai runtuh setelah balok tersebut diperkuat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perkuatan dengan metode DE yang dilakukan dalam penelitian ini dapat meningkatkan kapasitas beban ultimit sampai dengan 43% dibandingkan dengan benda uji kontrol. Sementara itu kekakuan pada balok yang diperkuat dengan metode DE juga meningkat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekakuan balok yang diperkuat pada fase linear meningkat sampai dengan 70% sementara kekakuan balok pada kondisi ultimit meningkat sampai dengan 91% dibandingkan dengan kekakuan benda uji kontrol.

Kata kunci: *perkuatan, beton bertulang, metode DE, beban ultimit, kekakuan*

Abstract

Current standards for load capacity are often not met by existing reinforced concrete (RC) structures due to increased loads and corrosion-related degradation of concrete and steel reinforcement bars. This study has developed a technique for repairing RC beams through the use of deep embedment (DE) bars. Three beams, each with a cross-section of 150 × 200 mm and a total length of 1400 mm, were constructed with plain bars of 8 and 12 mm diameter as DE bars. Two loading schemes were employed during testing: loading the beam up to failure and precracking to simulate the damage in RC structures. Results showed that the contribution of DE bars to the load capacity was significant. The load capacity of the strengthened beam was 43% higher than that of the control beam. The stiffness of the DE-reinforced beam also increased, with an up to 70% increase in the linear phase and an up to 91% increase in the ultimate condition. The use of embedded DE bars is an effective method for repairing and strengthening RC beams that do not meet load capacity standards. These findings have practical implications for the structural engineering industry, offering a viable solution for deteriorating RC structures.

Keywords: *strengthening, reinforced concrete, DE method, ultimate load, stiffness*

1. Latar Belakang

Kerusakan pada struktur beton bertulang bisa terjadi secara tiba-tiba tanpa ada peringatan akan terjadi keruntuhan. Kerusakan yang terjadi pada struktur beton bertulang diawali dengan retak pada penampang struktur. Retak pada struktur beton akan menyebabkan korosi pada tulangan baja seperti yang banyak ditemukan pada struktur yang berada di daerah rawa/gambut dan pesisir. Korosi yang terjadi akan menyebabkan kerusakan pada beton (Shi, 2018), yang pada akhirnya akan menyebabkan berkurangnya kekuatan dan kemampuan layan dari struktur tersebut (Dutta et al., 2023). Selain korosi, kerusakan struktur dapat juga terjadi akibat peningkatan beban yang bekerja pada strukturnya (Hanif & Kanakubo, 2017; Kristianto et al., 2017; Wijaya & Saputra, 2016).

Banyak metode yang sudah dilakukan untuk meningkatkan kapasitas beban struktur balok beton bertulang. Beberapa metode ini di antaranya a) metode konvensional dengan cara memperbesar dimensi balok atau menempelkan plat baja pada penampang balok (Faghihmaleki, 2021; Lie et al., 2021), dan b) metode baru dengan menggunakan material komposit *fiber reinforced polymer* (FRP) (Djamaluddin et al., 2015). Metode perkuatan dengan menggunakan material FRP ini dapat dilakukan dengan cara *external bonded* (EB) yaitu merekatkan lembaran FRP ke permukaan beton (Benzeguir Zine El et al., 2019; Chalioris et al., 2020; Jamal et al., 2016; Kar & Biswal, 2021; Oller et al., 2019; Sultan et al., 2022), dan atau *near-surface mounted* (NSM) yaitu memasang tulangan pada alur yang dibuat di permukaan selimut beton (Ibrahim et al., 2020; Nikoloutsopoulos et al., 2023; Panahi et al., 2021; Utomo et al., 2021; Zhang et al., 2017).

Hasil penelitian memperlihatkan metode-metode ini dapat meningkatkan kapasitas beban struktur. Pada penelitian yang dilakukan oleh Oller et al. (2019), perkuatan dengan metode EB dapat meningkatkan beban sampai 10% dibanding beban pada balok kontrol. Sementara penelitian yang dilakukan oleh Ibrahim et al. (2020), perkuatan dengan metode NSM dapat meningkatkan beban sampai 31%. Akan tetapi metode perkuatan ini memiliki kelemahan, yaitu proses pelaksanaan yang rumit dan membutuhkan tenaga yang terampil, serta rawan terhadap vandalisme karena material FRP yang bersifat ekspos. Hasil penelitian juga menunjukkan terjadi *debonding* dan *detachment* sehingga kapasitas ultimit FRP yang digunakan tidak tercapai (Bennegadi et al., 2016; Bocciarelli & Pisani, 2017; Fu et al., 2018; Ozbakkaloglu et al., 2017). *Debonding* dan *detachment* ini terjadi akibat kuat tarik beton jauh lebih kecil dari kuat tarik material perkuatannya (Hadjazi et al., 2016; Utomo et al., 2021).

Untuk mengatasi masalah ini, metode perkuatan dengan metode *deep embedment* (DE) diusulkan untuk meningkatkan kapasitas beban pada balok beton bertulang. DE adalah metode perkuatan dengan menambahkan tulangan vertikal ke dalam penampang beton. Metode DE ini sebelumnya sudah digunakan pada perbaikan sambungan balok dan kolom bertulang bangunan gedung akibat beban gempa. Perkuatan dengan metode DE ini dapat meningkatkan kapasitas geser, daktilitas dan kekakuan sambungan balok kolom masing-masing sebesar 21%, 93% dan 35% dibandingkan sambungan balok kolom eksisting (Ridwan et al., 2019; Ridwan et al., 2018). Analisis dengan menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa peningkatan beban berbanding lurus dengan luas tulangan DE yang ditambahkan (Chandra et al., 2019).

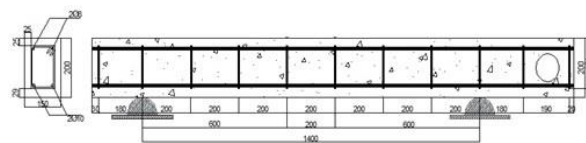
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan tulangan vertikal yang dilakukan dengan menggunakan metode DE terhadap kekuatan balok beton bertulang. Analisis hasil dilakukan dengan membandingkan pola retak, kurva hubungan beban-lendutan dan kekakuan balok yang diperkuat dengan balok yang tidak diperkuat.

2. Metode Penelitian

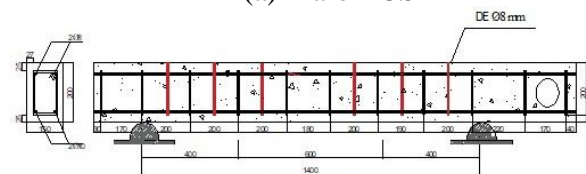
2.1 Deskripsi benda uji

Penelitian ini menggunakan tiga buah benda uji balok beton bertulang, yaitu Balok-CS (benda uji kontrol) dan Balok-D8 serta Balok-D12 untuk benda uji yang diperkuat. Gambar 1 (a), Gambar 1 (b) dan Gambar 1 (c) memperlihatkan detail penulangan untuk masing-masing benda uji Balok-CS, Balok-D8 dan Balok D-12. Gambar 1 (d) memperlihatkan benda uji balok beton bertulang setelah dilaksanakan pengecoran. Lokasi penambahan tulangan vertikal untuk benda uji yang diperkuat dapat dilihat pada Gambar 1 (b) dan Gambar 1 (c). Tulangan DE ditambahkan di tengah-tengah tulangan geser eksisting.

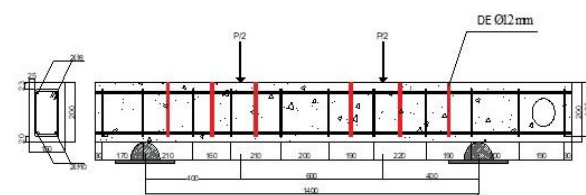
Semua benda uji mempunyai dimensi yang sama, yaitu ukuran penampang 150 mm x 200 mm dan panjang bentang 1400 mm. Tulangan pokok daerah tarik menggunakan tulangan diameter 10 mm, sementara masing-masing untuk tulangan pokok daerah tekan dan sengkang menggunakan tulangan diameter 8 mm dan 6 mm. Ada dua ukuran tulangan yang digunakan sebagai tulangan perkuatan DE, yaitu tulangan diameter 8 mm dan 12 mm.



(a) Balok-CS



(b) Balok-D8



(c) Balok-D12



(d) Benda uji balok beton bertulang

Gambar 1 Detail penulangan dan benda uji balok beton bertulang

2.2 Mutu bahan

Gambar 2 (a) memperlihatkan pengujian kuat tekan silinder beton. Kuat tekan beton diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan terhadap sampel silinder sesuai aturan ASTM C39 (ASTM, 2021). Kuat tekan beton rata-rata untuk benda uji Balok-CS, Balok-D8 dan Balok D-12 masing-masing adalah 11,35 MPa, 20,18 MPa dan 19,32 MPa.

Tabel 1 Kuat tekan benda uji balok beton bertulang

No	Kode Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)
1.	Balok-CS	11,35
2.	Balok-D8	20,18
3.	Balok-D12	19,32

Tabel 2 Spesifikasi tulangan

No	Diameter Nominal (mm)	Kuat Leleh, f_y (MPa)	Kuat Ultimit, f_u (MPa)	Modulus Elastis, E_s (MPa)	Penggunaan
1.	6	326,76	328,76	200.000	Sengkang
2.	8	363,67	509,25	200.000	Tulangan pokok tekan dan DE
3.	10	379,10	379,26	200.000	Tulangan pokok tarik
4.	12	334,65	487,10	200.000	Tulangan DE

Uji tarik juga dilakukan untuk mendapatkan karakteristik material tulangan yang digunakan pada benda uji balok. Gambar 2 (b) memperlihatkan pengujian kuat tarik tulangan baja. Dari hasil uji tarik didapatkan kuat leleh (f_y) untuk tulangan diameter 6, 8, 10 dan 12 mm masing-masing adalah 326,76 MPa, 363,67 MPa, 379,10 MPa dan 334,65 MPa. Sementara kuat tarik ultimit (f_u) untuk tulangan diameter 6, 8, 10 dan 12 mm masing-masing adalah 328,76 MPa, 509,25 MPa, 379,26 MPa dan 487,10 MPa. Nilai modulus elastis untuk semua tipe tulangan yang digunakan adalah 200.000 MPa. Karakteristik material beton dan tulangan dapat dilihat di Tabel 1 dan Tabel 2.



(a)



(b)

Gambar 2 Pengujian mutu bahan: (a) kuat tekan beton, (b) kuat tarik tulangan baja

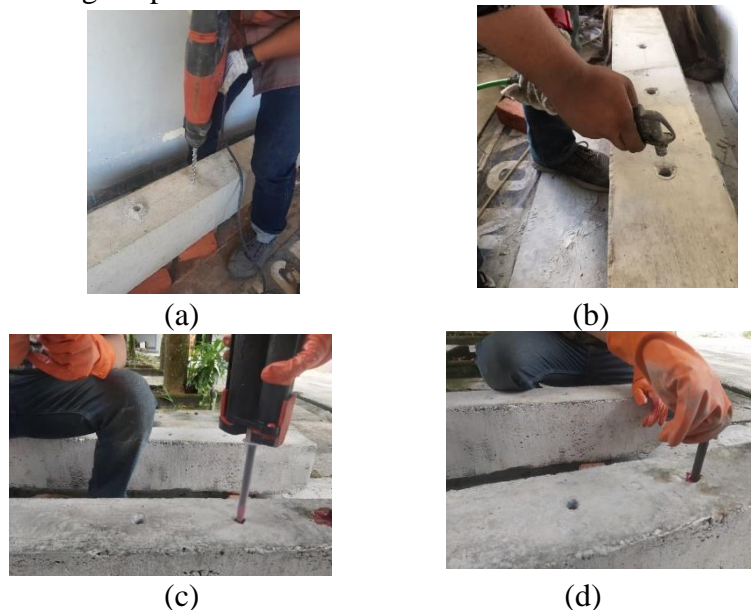
Untuk merekatkan tulangan DE digunakan resin epoksi HIT-RE 500 dari HILTI. Karakteristik material epoksi yang digunakan memiliki kuat tekan 82,7 MPa, kuat tarik 43,5 MPa, modulus elastis 1493 MPa dan kuat lekat 12,4 MPa.

2.3 Pelaksanaan perkuatan

Perkuatan balok yang dilakukan dalam penelitian ini adalah perkuatan dengan metode DE. DE adalah perkuatan dengan menambahkan tulangan vertikal ke dalam penampang beton. Prosedur pelaksanaan perkuatan dengan metode DE dapat dilihat pada Gambar 3.

Pertama, penampang balok dibor di lokasi di mana akan dipasang tulangan perkuatan DE (Gambar 3 (a)). Diameter lubang yang disarankan adalah 1,5 kali diameter tulangan DE. Lokasi pemasangan tulangan DE pada balok yang diperkuat, dapat dilihat pada Gambar 1 (b) dan Gambar 1 (c). Kemudian lubang hasil pengeboran dibersihkan dari debu dan partikel beton dengan menggunakan kuas dan kompresor udara (Gambar 3 (b)).

Langkah berikutnya, tulangan perkuatan DE dipotong sesuai dengan kebutuhan. Dalam hal ini, panjang tulangan DE yang digunakan sama dengan tinggi total balok. Kemudian epoksi resin diinjeksikan ke dalam lubang hasil pengeboran sebanyak 2/3 dari volume lubang (Gambar 3 (c)). Pada saat yang sama, tulangan DE yang sudah dipotong diolesi dengan epoksi resin. Langkah terakhir, tulangan DE dimasukkan ke dalam lubang dan sisa-sisa epoksi disekitar lubang dibersihkan (Gambar 3 (d)). Retak halus yang terjadi pada pengujian tahap pertama juga diinjeksi dengan epoksi resin.



Gambar 3 Prosedur pelaksanaan perkuatan pada balok beton bertulang menggunakan metode DE

2.4 Setup pengujian

Balok yang akan diuji ditempatkan di atas tumpuan berupa sendi-rol dengan sistim pembebanan dua titik. Tumpuan sendi-rol ini sudah dipersiapkan sebelumnya dan ditempatkan dalam *loading frame* dengan kapasitas beban 600 kN.

Beban diberikan ke balok dengan menggunakan pompa hidrolik dan diteruskan ke *hydraulic cylinder* dengan kapasitas beban maksimum 250 kN. Pada saat pengujian, dilakukan pengukuran beban (P) dan lendutan (δ) di tengah bentang balok. *Setup* pengujian balok dapat dilihat pada Gambar 4. Dari hasil pengukuran ini kemudian dapat dihitung kekakuan balok dengan menggunakan persamaan (1).

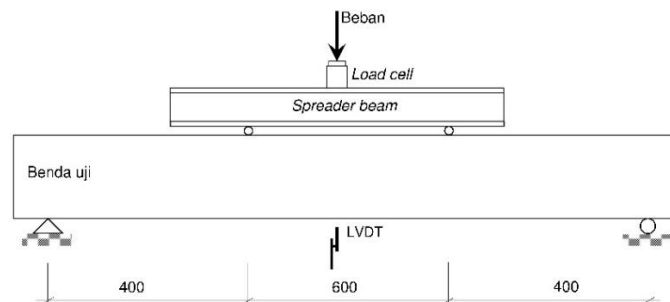
$$k = \frac{P}{\delta} \quad (1)$$

Keterangan

k = kekakuan balok (kN/mm)

P = beban (kN)

δ = lendutan (mm)



Gambar 4 *Setup* benda uji

Balok kontrol (Balok-CS) dan balok yang diperkuat (Balok-D8 dan Balok-D12) diberi perlakuan prosedur pengujian yang berbeda. Balok-CS dibebani sampai runtuh, sementara Balok-D8 dan Balok-D12 dibebani 2 kali. Pembebanan pertama dilakukan sampai balok tersebut mengalami retak pertama. Kemudian benda uji diturunkan dari *loading frame* untuk dilakukan perkuatan. Setelah diperkuat, benda uji ditempatkan kembali ke *loading frame* dan diuji sampai runtuh.

2.5 Kapasitas geser dan lentur balok

Analisis kapasitas geser dan kapasitas lentur penampang balok dihitung dengan menggunakan pedoman dari SNI 2847-2019 (BSN, 2019). Untuk memprediksi kekuatan geser balok sebelum dilakukan pengujian, digunakan persamaan berikut:

$$\phi_v \times (V_c + V_s) \geq V_u \quad (2)$$

Keterangan

V_c = kuat geser beton (kN)

V_s = kuat geser sengkang (kN)

V_u = gaya geser terfaktor (kN)

ϕ_v = faktor reduksi geser

Sementara kapasitas lentur balok dianalisis dengan menggunakan kesetimbangan regangan pada persamaan berikut:

$$\phi_b \times \left[C_c \left(c - \frac{a}{2} \right) + C_s (c - d_c) + T_s (d - c) \right] \geq M_u \quad (3)$$

Keterangan

- C_c = resultan gaya tekan pada beton (kN)
- C_s = resultan gaya tekan pada tulangan tekan (kN)
- T_s = resultan gaya tarik pada tulangan tarik (kN)
- d = tinggi efektif balok
- d_c = penutup beton
- c = tinggi garis netral pada kondisi ultimit
- a = tinggi blok tekan beton
- ϕ_b = faktor reduksi lentur

3. Hasil dan Pembahasan

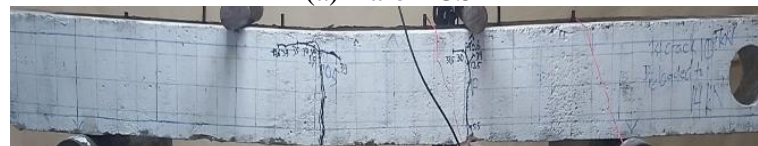
3.1 Pola retak

Gambar 5 memperlihatkan perbandingan pola retak benda uji. Gambar 5 (a) memperlihatkan retak pertama Balok-CS terjadi di daerah lentur pada sisi tarik balok pada beban 11 kN. Saat beban ditambah, retak lentur di daerah yang sama memanjang dan merambat ke sisi atas balok. Balok mengalami keruntuhan pada beban maksimum 30 kN.

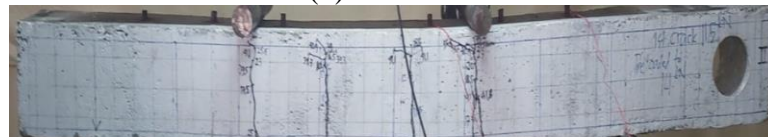
Tahap pertama pada pengujian Balok-D8, terjadi retak pertama pada beban 10 kN (Gambar 5 (b)). Pada posisi beban 13,5 kN, retak pada lokasi yang sama memanjang dan merambat ke atas. Kemudian pengujian tahap pertama dihentikan dan dilakukan perkuatan pada benda uji dengan pola perkuatan seperti yang terlihat pada Gambar 1 (b). Balok yang sudah diperkuat dikembalikan ke *loading frame* dan dilakukan pengujian tahap kedua. Seperti yang tampak pada Gambar 5 (b), retak yang terjadi pada balok yang telah diperkuat terjadi pada daerah lentur di tengah bentang balok. Pada beban 30 sampai dengan 39 kN, retak vertikal terbentuk di lokasi yang sama dengan retak pada pengujian tahap pertama. Beban maksimum hasil pengujian pada Balok-D8 adalah 42 kN.



(a) Balok-CS



(b) Balok-D8



(c) Balok-D12

Gambar 5 Perbandingan pola retak benda uji

Gambar 5 (c) memperlihatkan pola retak pada Balok-D12. Retak pertama terjadi pada beban 11,5 kN dan pada beban 13,5 kN retak pada lokasi yang sama

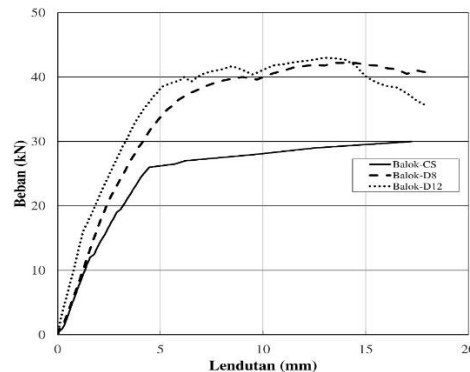
memanjang. Kemudian benda uji diturunkan dari *loading frame* dan diperkuat dengan pola perkuatan seperti yang tampak pada Gambar 1 (c). Setelah diperkuat, pengujian diteruskan pada tahap ke dua sampai balok runtuh. Pola retak yang terlihat sama dengan pola retak yang terjadi pada fase pertama. Terlihat pada Gambar 3 (c) bahwa retak yang terjadi pada palok yang diperkuat ini berupa retak vertikal yang terjadi di daerah lentur balok. Benda uji akhirnya mengalami keruntuhan lentur pada beban maksimum 41 kN.

3.2 Kurva hubungan beban-lendutan dan kekakuan balok

Gambar 6 memperlihatkan perbandingan kurva beban-lendutan untuk benda uji yang digunakan dalam penelitian ini. Terlihat dari Gambar 6 bahwa respon linear kurva beban-lendutan Balok-CS dan Balok-D8 pada beban kecil (sampai dengan 33% dari kapasitas balok tanpa perkuatan) hampir sama. Sementara respon kurva beban-lendutan Balok-D12 pada kondisi linear lebih besar dibanding kedua balok lainnya. Tabel 3 memperlihatkan bahwa pada kondisi linear, kekakuan Balok-D12 dan Balok-D8 masing-masing adalah 70% dan 9% lebih besar dibandingkan dengan kekakuan Balok-CS.

Tabel 3 Perbandingan kekakuan balok sebelum mengalami retak

No	Kode Benda Uji	Beban retak pertama (kN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (kN/mm)
1.	Balok-CS	12,0	1,57	7,64
2.	Balok-D8	12,0	1,44	8,33
3.	Balok-D12	12,5	0,96	13,02

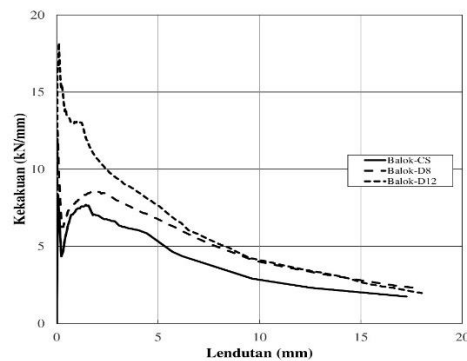


Gambar 6 Perbandingan kurva beban-lendutan benda uji

Setelah fase liner, kemiringan kurva beban-lendutan berkurang. Perubahan kemiringan kurva menunjukkan beton sudah mengalami retak dan kekakuan balok juga berkurang. Saat kemampuan tarik beton sudah terlampaui, maka beban akan ditahan oleh tulangan horizontal dan tulangan vertikal DE. Beban maksimum pada masing-masing benda uji Balok-CS, Balok-D8 dan Balok-D12 masing-masing adalah 30 kN, 42 kN dan 43 kN. Dari hasil pengujian tampak bahwa peningkatan beban yang terjadi pada benda uji Balok-D12 dan Balok-D8 masing-masing adalah 43% dan 41% dibandingkan dengan benda uji kontrol Balok-CS.

Gambar 7 memperlihatkan kurva perbandingan kekakuan benda uji. Dari Gambar 7 terlihat bahwa setelah mengalami retak, kekakuan balok berkurang

secara perlahan dan mengalami fase nonlinear. Dibandingkan dengan kekakuan linearnya, kekakuan balok pada kondisi nonlinear lebih rendah. Dari hasil pengujian terlihat bahwa kekakuan Balok-CS pada kondisi beban maksimum adalah 1,74 kN/mm, sementara kekakuan Balok-D8 dan Balok-D12 pada kondisi beban maksimum masing-masing adalah 3,13 kN/mm dan 3,31 kN/mm. Terlihat bahwa pada kondisi ultimit, terjadi peningkatan kekakuan pada Balok-D8 dan Balok-D12 masing 91% dan 80% dibandingkan dengan Balok-CS.



Gambar 7 Perbandingan kekakuan benda uji

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Penambahan tulangan vertikal dengan menggunakan metode DE pada balok beton bertulang memiliki pengaruh terhadap kapasitas beban ultimit dan kekakuan balok baik pada fase linear maupun pada fase ultimit. Perkuatan balok yang dilakukan dengan metode DE dalam penelitian ini dapat meningkatkan kapasitas beban ultimit sampai dengan 43% dibandingkan dengan benda uji kontrol. Sementara itu kekakuan pada balok yang diperkuat dengan metode DE juga meningkat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekakuan balok yang diperkuat pada fase linear meningkat sampai dengan 70% sementara kekakuan balok pada posisi ultimit meningkat sampai dengan 91% dibandingkan dengan kekakuan benda uji kontrol.

4.2 Saran

Studi parametrik perlu dilakukan untuk mendapatkan pengaruh beberapa parameter seperti mutu beton dan jarak pemasangan tulangan DE terhadap peningkatan kapasitas beban yang dihasilkan dari perkuatan balok beton bertulang yang dilakukan dengan menggunakan metode ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Riau atas bantuan dana penelitian yang diberikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Teknologi Bahan Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau atas bantuan saat pengujian karakteristik material beton.

Daftar Kepustakaan

- ASTM (2021) *2021: ASTM C39/C39M-21 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bennegadi, M. L., Hadjazi, K., Sereir, Z., Amziane, S. & El Mahi, B. (2016) General cohesive zone model for prediction of interfacial stresses induced by intermediate flexural crack of FRP-plated RC beams. *Engineering Structures*, 126, 147-157, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.030>.
- Benzeguir Zine El, A., El-Saikaly, G. & Chaallal, O. (2019) Size Effect in RC T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP Sheets: Experimental Study. *Journal of Composites for Construction*, 23(6), 04019048, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000975](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000975).
- Bocciarelli, M. & Pisani, M. A. (2017) Survey on the interface behaviour in reinforced concrete beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 118, 169-176, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.047>.
- BSN (2019) *2019: SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Chalioris, C. E., Zapris, A. G. & Karayannis, C. G. (2020) U-Jacketing Applications of Fiber-Reinforced Polymers in Reinforced Concrete T-Beams against Shear—Tests and Design. *Fibers*, 8(2), <https://doi.org/10.3390/fib8020013>.
- Chandra, N., Ridwan, R. & Ikhsan, M. (2019) Finite element modelling of reinforced concrete beam strengthened with embedded steel reinforcement bars. *Journal of Applied Materials and Technology*, 1(1), 38-45, <https://doi.org/10.31258/jamt.1.1.38-45>.
- Djamaluddin, R., Irmawaty, R. & Kwandou, R. (2015) Kapasitas Rekatan GFRP-S pada Balok Beton Akibat Perendaman Air Laut. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(1), 23-30, <https://doi.org/10.5614/jts.2015.22.1.3>.
- Dutta, B., Nath Nayak, A., Dirar, S., Nanda, B. & Theofanous, M. (2023) Shear strengthening of continuous RC T-beams with deep embedded CFRP and steel bars: A numerical study. *Structures*, 52, 187-204, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.157>.
- Faghihmaleki, H. (2021) Comparison of Concrete and Steel Jacket Methods for Reinforcing A Concrete Bridge Pier by Numerical and Experimental Studies. *Makara Journal of Technology*, 25(2), 63-70, <https://doi.org/10.7454/mst.v25i2.3909>.
- Fu, B., Tang, X. T., Li, L. J., Liu, F. & Lin, G. (2018) Inclined FRP U-jackets for enhancing structural performance of FRP-plated RC beams suffering from IC debonding. *Composite Structures*, 200, 36-46, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.074>.
- Hadjazi, K., Sereir, Z. & Amziane, S. (2016) Creep response of intermediate flexural cracking behavior of reinforced concrete beam strengthened with an externally bonded FRP plate. *International Journal of Solids and Structures*, 94-95, 196-205, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.04.012>.

- Hanif, F. & Kanakubo, T. (2017) Shear Performance of Fiber-Reinforced Cementitious Composites Beam-Column Joint Using Various Fibers. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 3(2), <https://doi.org/10.22146/jcef.26571>.
- Ibrahim, M., Wakjira, T. & Ebead, U. (2020) Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer strips. *Engineering Structures*, 210, 110412, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110412>.
- Jamal, A. U., Bale, H. A. & Haqiqi, I. (2016) Perilaku Lentur Perbaikan Balok Beton Bertulang dengan Variasi Lebar Carbon Fibre Reinforced Polymer. *Teknisia*, 20(2), 154-162.
- Kar, S. & Biswal, K. C. (2021) Rehabilitation of RC flexural members in shear with externally bonded fiber-reinforced polymer composites: present status and future need. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(3), 130, <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00274-8>.
- Kristianto, A., Pranata, Y. A. & Imran, I. (2017) Studi Eksperimental Penggunaan Pen-Binder dan FRP Sebagai Perkuatan Tulangan Tidak Standar Pada Kolom Lingkaran. *Jurnal Teknik Sipil*, 24(1), 51-60, <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.1.7>.
- Lie, H. A., Utomo, J., Hu, H.-T. & Lestari, L. T. (2021) Seismic Retrofitting of Irregular Pre-80s Low-rise Conventional RC Building Structures. *Civil Engineering Dimension*, 23(1), 9-19, <https://doi.org/10.9744/ced.23.1.9-19>.
- Nikoloutsopoulos, N., Sotiropoulou, A. & Passa, D. (2023) Deep embedment and NSM techniques for shear strengthening of reinforced concrete slender beams with cFRP ropes. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.254>.
- Oller, E., Pujol, M. & Marí, A. (2019) Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. *Composites Part B: Engineering*, 164, 235-248, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.065>.
- Ozbakkaloglu, T., Fang, C. & Gholampour, A. (2017) Influence of FRP anchor configuration on the behavior of FRP plates externally bonded on concrete members. *Engineering Structures*, 133, 133-150, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.005>.
- Panahi, M., Zareei, S. A. & Izadi, A. (2021) Flexural strengthening of reinforced concrete beams through externally bonded FRP sheets and near surface mounted FRP bars. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00601, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00601>.
- Ridwan, Dirar, S., Jemaa, Y., Theofanous, M. & Elshafie, M. (2019) Strengthening of seismically deficient exterior beam-column connections using embedded steel bars, *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering (ICAnCEE 2018)*. Bali, Indonesia, October 24-25, 2018. MATEC Web Conf.
- Ridwan, R., Dirar, S., Jemaa, Y., Theofanous, M. & Elshafie, M. (2018) Experimental Behavior and Design of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints Strengthened with Embedded Bars. *Journal of Composites for Construction*, 22(6), 04018047, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000883](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000883).

- Shi, X. (2018) 4 - Monitoring of reinforced concrete corrosion, in Pacheco-Torgal, F., Melchers, R. E., Shi, X., Belie, N. D., Tittelboom, K. V. & Sáez, A. (eds), *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* Woodhead Publishing, 69-95.
- Sultan, M. A., Ridwan, A. R. & Gaus, A. (2022) Efek Perkuatan Glass Fiber Reinforce Polymer Sheet Pada Balok Beton Bertulang Dengan Tulangan Korosi. *TERAS JURNAL* 12(1), 103-116, <https://doi.org/10.29103/tj.v12i1.694>
- Utomo, J., Khusyeni, M. N., Partono, W., Han, A. L. & Gan, B. S. (2021) Experimental Investigation on the Failure Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Strengthened Reinforced Concrete T-beams. *Civil Engineering Dimension*, 23(2), 115-122, <https://doi.org/10.9744/ced.23.2.115-122>.
- Wijaya, R. A. & Saputra, A. (2016) Repairing and Retrofitting of Earthquake-Affected Exterior Beam-Column Connection by Using Resin Concrete. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 2(2), <https://doi.org/10.22146/jcef.27150>.
- Zhang, S. S., Yu, T. & Chen, G. M. (2017) Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted (NSM) CFRP strips: Current status and research needs. *Composites Part B: Engineering*, 131, 30-42, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.072>.