



Terbit *online* pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

[ISSN \(Print\) 2337-6910](#) | [ISSN \(Online\) 2460-1039](#)



Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Eksisting Dengan Menggunakan Metode Deep Embedment

Ilham Akbar^a, Ridwan^b, Muhammad Ikhsan^c

^{a,b,c}Universitas Riau, Kampus Bina Widya, Jl. HR. Soebrantras KM 12,5, Pekanbaru 28293, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 29 Mei 2023

Revisi Akhir: 09 November 2023

Diterbitkan *Online*: 29 Desember 2023

KATA KUNCI

Balok Beton Bertulang Eksisting

Forensik Tes

Perkuatan Geser

Metode *Deep Embedment*

KORESPONDENSI

Telepon: +682172233166

E-mail: ilham.akbar@student.unri.ac.id

ABSTRACT

Kapasitas beban struktur beton bertulang eksisting seringkali tidak mencukupi untuk memenuhi standar saat ini. Hal ini dikarenakan peningkatan kebutuhan beban, ketentuan geser yang tidak memadai pada desain asli, degradasi material, atau meningkatnya kapasitas geser yang terkait dengan penguatan lentur. Penelitian ini mendemonstrasikan metode perbaikan kapasitas geser balok beton bertulang yang efektif dengan menggunakan tulangan baja tertanam. Riwayat pembebanan direproduksi dalam bentuk retak dalam rentang elastis pada balok 2000 x 150 x 200 mm, balok tersebut diperbaiki dan kemudian dibebani kembali hingga gagal dalam uji eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontribusi tulangan baja yang tertanam pada inti balok RC terhadap kapasitas beban dapat signifikan. Kekakuan awal balok perkuatan tertinggi adalah 13,07 kN/mm, yaitu 69% lebih tinggi dari balok kontrol. Perpindahan beban ultimit dari balok yang diperkuat adalah 43 kN dengan lendutan sebesar 13 mm, yang lebih tinggi 53% dari balok kontrol. Perkembangan retakan selama fase beban kedua dari balok yang diperkuat identik dengan yang pertama. Retakan yang berkembang melebar saat beban meningkat dan spesimen akhirnya runtuh secara lentur. Kapasitas geser balok yang diperkuat sebesar 43,73 kN pada balok BII lebih tinggi dari balok kontrol.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan utama yang umum digunakan pada berbagai macam konstruksi struktur bangunan. Umumnya, untuk membentuk struktur bangunan ini digunakan material komposit berupa gabungan antara beton dan tulangan baja yang bekerja untuk menahan beban. Penggunaan beton bertulang umum digunakan sebagai bahan utama pembentuk struktur bangunan karena material yang digunakan mudah didapat dan proses pengerjaan yang mudah. Berbagai permasalahan sejumlah struktur bangunan lama dan beberapa bangunan baru yang menggunakan beton bertulang tidak berfungsi semestinya. Hal ini disebabkan karena peningkatan beban, lingkungan yang agresif, kerusakan material atau peningkatan kapasitas geser karena beban lentur [1].

Solusi mengatasi permasalahan kapasitas geser dari balok beton bertulang tersebut terdapat beberapa metode yang digunakan seperti *Externally Bonded* (EB) dan *Near-Surface Mounted* (NSM) yang telah banyak digunakan untuk menambah kapasitas geser pada balok beton bertulang. Sistem perkuatan *Externally Bonded* (EB) dan *Near-Surface Mounted* (NSM) telah terbukti memberikan peningkatan kapasitas geser yang signifikan pada struktur beton bertulang [2]. Perkuatan dengan metode EB dan NSM membutuhkan persiapan yang rumit, material yang telah terpasang terekspos pada permukaan balok sehingga perlu dilindungi dengan material *coating* untuk menghindari pengaruh dari temperatur yang tinggi dan tangan-tangan jahil (*vandalism*). Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa terlepasnya material dari permukaan beton (*debonding*) adalah kekurangan utama dari metode-

metode ini sehingga kapasitas beban ultimit materialnya tidak dapat tercapai

Untuk mengatasi permasalahan perkuatan dengan metode *Externally Bonded* (EB) dan *Near-Surface Mounted* (NSM), penelitian kali ini dilakukan pengujian terhadap struktur balok beton bertulang dengan kondisi yang sudah lama terbungkal dengan menggunakan metode *Deep Embedment* (DE). Metode ini sebelumnya dikenal sebagai *Embedded Through-Section* (ETS) yang diperkenalkan untuk mengatasi kelemahan dari sistem sebelumnya [3].

Sejumlah penelitian telah menguji keandalan metode penguatan balok beton bertulang di bawah beban geser. Hasil penyelidikan penelitian yang dipublikasikan sangat bermanfaat, terutama ketika implikasi jenis, kekakuan, dan konfigurasi material komposit terhadap peningkatan kekuatan geser. Faktor-faktor lain, seperti riwayat beban, yang dapat mempengaruhi proses penahan geser, belum mendapatkan perhatian yang cukup. Oleh karena itu, penelitian ini untuk mengidentifikasi bagaimana perilaku balok beton pra-retak yang diperkuat dengan batang DE. Perilaku balok yang diperkuat diberikan dan dievaluasi dengan perilaku balok kontrol dalam hal pengembangan retak, mode kegagalan, dan kurva perpindahan beban.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Bertulang

Beton terdiri dari campuran agregat yang dilekatkan oleh pasta yang terbuat dari semen portland dan air. Pasta akan mengisi ruang – ruang kosong diantara agregat setelah beton segar dicor, material ini mengeras sebagai akibat dari reaksi – reaksi kimia antara semen dan air yang membentuk struktur padat dan tahan lama. Material ini umum digunakan sebagai bahan konstruksi di Indonesia.

Beton adalah material yang kuat terhadap tekan dan lemah terhadap tarik. Beton akan mengalami keretakan ketika diberi tegangan tarik yang melebihi kekuatan tariknya. Untuk menahan gaya tarik, beton diberi kombinasi tulangan baja yang akan menahan gaya tarik pada beton. Dengan adanya tulangan baja ini maka diperoleh kombinasi beton bertulang dengan material beton untuk menahan tekan dan tulangan baja untuk menahan gaya tarik.

Balok merupakan elemen struktur yang memiliki fungsi memikul beban dengan arah tegak lurus terhadap sumbu longitudinal. Gaya-gaya dalam yang dihasilkan dari suatu balok dengan pembebanan tegak lurus, yaitu berupa momen lentur (*bending moment*) dan gaya geser (*shear force*). Akibat moment lentur, pada bagian atas balok mengalami tegangan tekan dan bagian bawah mengalami tegangan tarik. Sedangkan akibat adanya gaya geser pada balok akan terjadi retak diagonal. Salah satu upaya untuk

mempertahankan kemampuan balok dalam mendukung beban adalah pada bagian momen dan geser [4]

Balok beton bertulang akan mengalami lentur ketika beban bekerja. Lentur ini sebagai akibat dari regangan deformasi yang disebabkan oleh beban eksternal, namun tidak terlalu kuat dalam memikul tegangan geser. Tegangan geser yang tinggi menimbulkan retak miring dan untuk mencegah dari retak miring tersebut, maka digunakan tulangan geser atau dikenal dengan penulangan transversal.

2.2. Perilaku Geser Balok Beton Bertulang

Terdapat dua jenis retak miring yang terjadi di balok, yaitu retak geser badan (*web-shear cracking*) dan retak geser lentur (*flexure-shear cracking*). Retak geser badan bermula dari titik interior pada komponen saat tegangan tarik melebihi kekuatan tarik beton. Retak geser lentur bermula dari retak lentur. Ketika retak lentur terjadi, tegangan geser pada beton akan meningkat. Retak geser lentur terjadi ketika kombinasi geser dan tegangan lentur tarik melebihi kekuatan tarik beton [5].

Perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan pada keadaan runtuh karena lentur. Balok tersebut langsung hancur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu. Pada keadaan runtuh karena geser, retak diagonalnya jauh lebih lebar dibandingkan dengan keadaan runtuh karena lentur. Retakan diagonal akibat kegagalan geser dibadan balok beton bertulang terjadi tanpa adanya retak lentur disekitarnya atau dapat juga terjadi dari kelanjutan proses retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya pada balok beton. Retak diagonal pada balok beton tanpa adanya retak lentur dapat terjadi disekitar daerah titik balik lendutan.

Gambar 1 dibawah menunjukkan distribusi tegangan lentur dan tegangan geser sesuai teori elastisitas untuk balok homogen. Tegangan lentur dihitung dengan persamaan

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad [1]$$

dengan :

σ = tegangan lentur (N/mm²)

M= momen lentur penampang (N.mm)

c = jarak titik berat elemen (mm)

I = inersia penampang (mm⁴)

atau persamaan untuk tegangan lentur balok beton menurut [6], sebagai berikut

$$\sigma = \frac{P.L}{b.h^2} \quad [2]$$

dengan :

σ = tegangan lentur (MPa)

P= beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji (pembacaan dalam ton sampai tiga angka dibelakang koma)

L= jarak (bentang) antara dua garis perlatakan (mm)

b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)

h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)

Untuk teggangan geser maksimum terjadi pada sumbu netral yang besarnya sama dengan $1,5 \tau_a$ (teggangan geser rata – rata) dengan

$$\tau_a = \frac{V}{bh} \quad [3]$$

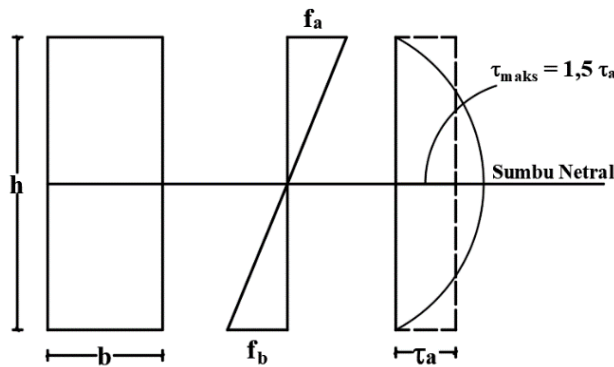
dengan :

τ_a = tegangan geser rata – rata (N/mm²)

V = gaya geser (N)

b = lebar penampang balok (mm)

h = tinggi balok (mm)



Gambar 1 Tegangan Geser dan Lentur pada Balok Persegi (Setiawan, 2016)

Balok beton bertulang mengalami kegagalan geser terjadi pada daerah gaya geser maksimum yang terletak pada daerah tumpuan balok beton dengan munculnya retak arah diagonal pada daerah tumpuan tersebut [6].

2.3 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

Persamaan untuk penulangan geser menurut adalah

$$V_u \leq \phi V_n \quad [4]$$

atau

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s) \quad [5]$$

dengan :

V_u : gaya geser terfaktor (N)

V_c : kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (N)

V_s : kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (N)

ϕ : faktor reduksi (0,75)

V_n : kekuatan geser nominal (N)

Untuk komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja, gaya geser dapat disumbangkan oleh beton (V_c) dapat dihitung :

$$V_{c1} = 0,17 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad [6]$$

$$V_{c2} = \left[(0,16 \lambda \sqrt{f_c'}) + \left(17 \times \rho_w \times \frac{V_u \times d}{M_u} \right) \right] \times b_w \times d \quad [7]$$

$$V_{c3} = \left[(0,16 \lambda \sqrt{f_c'}) + (17 \times \rho_w) \right] \times b_w \times d \quad [8]$$

$$V_{c4} = 0,29 \lambda \sqrt{f_c'} \times b_w \times d \quad [9]$$

Menentukan kekuatan geser beton digunakan V_c yang paling kecil dari persamaan diatas. Untuk gaya geser yang disumbangkan oleh sengkang vertikal (V_s) [5] menganggap retak diagonal membentuk sudut 45° terhadap sumbu panjang balok, V_s dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_s = \frac{A_s f_y d}{S} \quad [10]$$

dengan :

V_s : Kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN)

S : Jarak pusat ke batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok penampang (mm)

f_y : Kuat leleh tulangan geser (MPa)

d : Tinggi efektif balok (mm)

2.4 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

Persamaan-persamaan untuk kekuatan lentur menurut SNI 03-2847-2019 sebagai berikut:

$$\phi M_n \geq M_u$$

atau

$$\phi M_n = \left(C_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) + (C_s \times (d - d_s)) \quad (11)$$

Dengan :

M_u : Gaya lentur terfaktor (kN)

M_n : Gaya lentur nominal (kN)

Φ : Faktor reduksi (0,9)

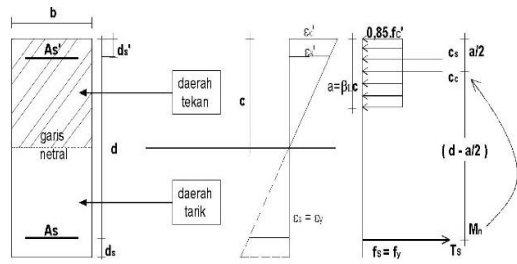
d : Jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke tengah tulangan tarik (mm)

d_c : Jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke tengah tulangan tekan (mm)

a : Jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke garis netral (mm)

C_c : Resultan gaya tekan pada beton (kN)

C_s : Resultan gaya tekan pada tulangan (kN)

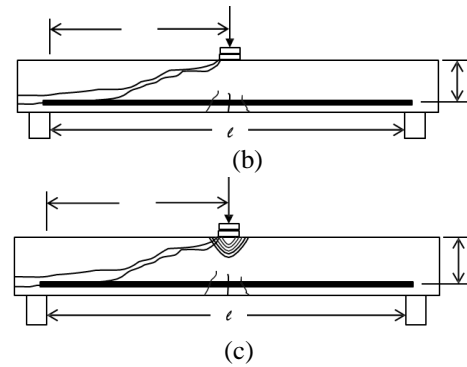
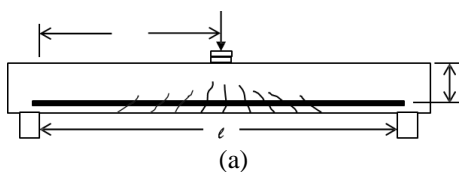


Gambar 2. Distribusi Tegangan Lentur pada Penampang Balok Beton Bertulang Tulangan Rangkap (Nawy, 2010)

2.5 Jenis Kegagalan Balok Beton Bertulang

Pada berbagai elemen beton struktural selain balok beton diketahui mengalami kegagalan dikarenakan tekanan geser, seperti yang terdapat pada pelat lantai, pondasi, kolom dan dinding geser. Mekanisme pemindahan geser sangat mirip bahkan hampir sama pada semua kasus struktur beton bertulang, namun terdapat perbedaan dalam pola retak pada balok beton bertulang. Kombinasi momen lentur dan gaya geser merupakan penyebab dasar retakan geser pada balok beton bertulang dengan komposisi tulangan geser yang kurang mencukupi untuk menahan gaya tersebut.

Keruntuhan geser terjadi pada perbandingan $(a/d) = 1$ s/d 2,5 untuk beban terpusat. Keruntuhan ditandai dengan adanya retak lentur halus vertikal di tengah bentang dan tidak terus menjalar. Hal ini dikarenakan adanya kehilangan lekatan pada perletakan antara tulangan longitudinal dengan beton di sekitarnya. Apabila terus dibebani, keruntuhan diikuti dengan timbulnya retak miring yang lebih curam dari pada retak diagonal tarik secara tiba-tiba yang menjalar menuju sumbu netral. Pertemuan retak miring beton tertekan yang menjadi penyebab keruntuhan secara tiba-tiba. Balok beton bertulang merupakan material yang tidak homogen dan kekuatan yang terjadi di sepanjang bentang merupakan variasi distribusi normal. Oleh karena itu tidak dapat dipastikan apakah retak diagonal dapat terjadi bersamaan pada kedua ujung perletakan. Selain itu ketidakhomogenan material beton bertulang dapat menyebabkan adanya tumpang tindih antara kegagalan lentur, kegagalan diagonal, dan kegagalan geser baik dari segi rasio bentang geser maupun tingginya [7]. Ragam kegagalan pada balok beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 3. dan Tabel 1. berikut.



Gambar 3. Ragam Keruntuhan sebagai Fungsi dari Kelangsingan Balok (a) keruntuhan lentur, (b) keruntuhan tarik diagonal, (c) keruntuhan geser (Nawy, 2010)

Tabel 1. Pengaruh Kelangsingan Balok terhadap Ragam Keruntuhan

Kategori Balok	Ragam Keruntuhan	Perbandingan Bentang Geser dengan Tinggi Sebagai Ukuran dan Kelangsingan	
		Beban Terpusat	Beban Terdistribusi
		a/d	l/d
Langsing	Lentur / Flexural (F)	>5,5	>16
Sedang	Tarik Diagonal / Diagonal Tension (DT)	2,5 – 5,5	11-16b
Tinggi	Tekan Geser / Shear Compression (SC)	1 – 2,5	1 – 5b

Sumber: Nawy, 2010

2.6 Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Metode Deep Embedment (DE)

Perkuatan geser yang sudah banyak diteliti banyak mengalami kegagalan pada balok beton bertulang dengan pengujian eksperimental. Salah satu kegagalan yang sering dijumpai yaitu terlepasnya material perkuatan yang diletakkan pada permukaan beton. Hal ini disebabkan oleh kekuatan tarik yang relatif rendah dari permukaan beton yang digunakan sehingga membatasi kekuatan lekatan antara material perkuatan terhadap permukaan beton. Untuk mengatasi kekurangan ini, teknik perkuatan dengan metode *deep embedment* (DE) dikembangkan untuk memperkuat kapasitas gaya geser balok beton bertulang [8].

Perkuatan geser dengan metode *deep embedment* (DE) adalah perkuatan dengan tulangan baja tertanam di dalam lubang balok yang telah disiapkan secara vertikal untuk memperkuat kapasitas geser balok beton bertulang. Teknik perkuatan DE ini memberikan efektifitas perkuatan yang lebih tinggi, karena teknik ini mengandalkan transfer langsung tegangan dari tulangan baja ke inti beton, tidak seperti perkuatan geser dengan metode *externally bonded* (EB) dan *near-surface mounted* (NSM). Selain itu,

persiapan permukaan beton terhadap perlindungan api dan vandalisme tidak diperlukan [9].

Perilaku balok beton bertulang non-engineered. Balok diperkuat dengan batang baja tertanam. Dua balok beton bertulang, balok kontrol (Beam-A) dan balok yang diperkuat (Beam-B) dibuat dan diuji dengan beban geser. Beam-B diperkuat dengan empat batang baja 12 mm yang tertanam di inti balok beton. Batang tertanam diberi jarak 200 mm dari tengah ke tengah di kedua daerah geser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Beam-A mengalami kegagalan geser sedangkan Beam-B gagal pada tegangan lentur dimana kebanyakan retakan berkembang pada bentang lentur. Batang baja yang tertanam terbukti mengubah mode kegagalan dari kegagalan geser pada Beam-A ke kegagalan lentur pada Beam-B. Selanjutnya, kapasitas geser dari balok yang diperkuat meningkat sebesar 31% dibandingkan dengan balok kontrol [2].

Penelitian pemodelan elemen hingga balok beton bertulang yang diperkuat dengan metode deep embedment yang bertujuan untuk menentukan beban dan lendutan maksimum yang terjadi pada balok beton bertulang dan menentukan pola retakan. Penelitian ini melakukan eksperimen dengan pembuatan benda uji dengan menggunakan metode deep embedment. Metode analisis untuk menentukan pola retak menggunakan perangkat lunak elemen hingga. Beban dan lendutan maksimum yang terjadi pada balok yang diperkuat dengan metode deep embedment adalah 31,82 kN dan 8,32 mm. pola ratak menunjukkan bahwa retak pertama terjadi di tengah bentang. Model keruntuhan balok pada elemen hingga mengalami keruntuhan lentur [10].

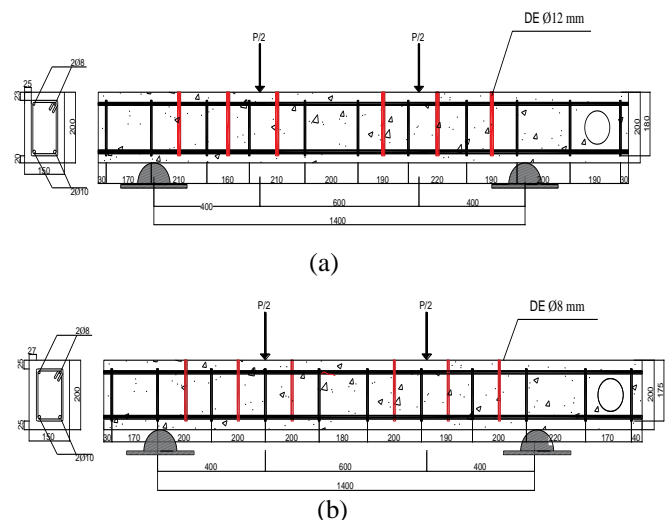
Penelitian untuk membandingkan perilaku balok beton bertulang tanpa tulangan geser melalui studi eksperimental dan pemodelan elemen hingga. Metode yang digunakan pada penelitian ini metode eksperimental dan juga analisis yaitu pembuatan dan pengujian beban geser serta lendutan benda uji balok beton bertulang tanpa tulangan geser, sehingga hasilnya dibandingkan dengan analisis pemodelan elemen hingga. Hasil penelitian pemodelan elemen hingga menunjukkan bahwa beban maksimum yang diperoleh balok beton bertulang tanpa tulangan geser adalah 31,493 kN dengan lendutan sebesar 8,054. Sedangkan melalui pengujian eksperimental didapatkan beban maksimum 27 kN dan lendutan 12,53 mm. Jadi analisis menggunakan program elemen hingga memiliki beban maksimum yang lebih tinggi dan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dari hasil pengujian eksperimental [4].

3. METODOLOGI

Pengujian eksperimental menggunakan benda uji balok beton bertulang eksisting dengan dimensi 150 mm x 200 mm dengan panjang total balok adalah 2000 mm

dengan jumlah benda uji sebanyak tiga balok beton, yaitu balok beton eksisting kontrol tanpa perkuatan, balok beton eksisting yang telah diretakkan dan diberi perkuatan dengan batang tertanam (DE) Ø8 mm dan Ø12 mm. Sebelum melakukan pengujian dilakukan pengujian forensik pada balok beton eksisting dengan pengujian *rebar locator*, *hammer test* dan *core drill* untuk mengambil data propertis dari balok beton eksisting.

Pengujian balok beton eksisting dilakukan dengan dua skema, pola pembebanan pertama yang hanya digunakan untuk menguji benda uji kontrol, melibatkan pembebanan balok hingga runtuh. Pola pembebanan yang tersisa melibatkan spesimen uji yang diretakkan untuk mensimulasikan keadaan kerusakan yang mungkin ada pada struktur beton bertulang yang memerlukan penguatan. Balok yang diperkuat terdiri dari enam batang baja Ø8 mm dan Ø12 mm yang tertanam di inti balok beton. Pada kedua zona geser, tulangan ditanam diantara sengkang eksisting. Balok dibor dilokasi yang ditentukan. Kemudian lubang disuntikkan menggunakan resin epoksi berkekuatan tinggi dan batang yang tertanam kemudian dimasukkan. Uji lentur empat titik dengan rasio bentang geser terhadap kedalaman 2,5 dilakukan pada semua balok. Balok dilengkapi dengan *transduser diferensial variabel linier* (LVDT) untuk mengukur defleksi pada bentang tengah di mana sel beban (*load cell*) digunakan untuk mengukur beban selama pengujian, setup benda uji yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Benda uji yang digunakan (a) Balok Perkuatan DE Ø12 mm, (b) Balok Perkuatan DE Ø8 mm

Kuat tekan diperoleh dengan pengujian sampel silinder *core drill* sesuai SNI 1974:2011 menggunakan mesin uji tekan. Kekuatan beton rata-rata untuk balok kontrol dan balok bertulang masing-masing hasil uji sampel *core drill* adalah 11,35 MPa, 19,32 MPa dan 20,18 MPa. Dimensi tulangan balok eksisting yang didapatkan dari pengujian *rebar locator* untuk tulangan tekan dengan Ø8 mm, tulangan tarik Ø10 mm dan tulangan sengkang Ø6

mm, dengan kekuatan luluh tulangan tekan, tarik dan sengkang masing – masing adalah 363,67 MPa, 379,09 MPa dan 284,67 MPa. Resin epoksi HIT-RE 500 dari HILTI digunakan untuk mengikat batang DE. Menurut spesifikasi pabrikan, epoksi memiliki kekuatan ikat 12,4 MPa, kekuatan tarik 43,5 MPa, dan kekuatan tekan 82,7 MPa.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Beban Retak Pertama

Pengujian balok beton eksisting dilakukan dengan dua skema, Pola pembebanan pertama, yang hanya digunakan untuk menguji benda uji kontrol, melibatkan pembebanan balok hingga runtuh. Pola pembebanan yang tersisa melibatkan spesimen uji yang diretakkan untuk mensimulasikan keadaan kerusakan yang mungkin ada pada struktur beton bertulang yang memerlukan penguatan. Untuk mengamati beban pada retak pada eksperimental dilakukan pengamatan visual setiap kenaikan beban 0,5 kN. Tabel 2. dapat dilihat hasil beban retak pertama balok beton eksisting.

Tabel 2. Hasil Beban Retak Pertama Balok Beton Eksisting

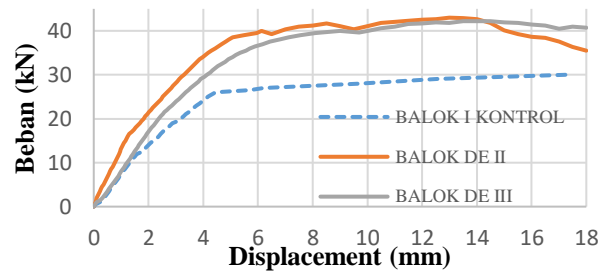
No	Kode Sampel	Beban First Crack		Lendutan Sebelum diperkuat	Lendutan Setelah diperkuat	Kekakuan Setelah diperkuat
		Eksperimen (kN)	SNI (kN)	mm	mm	kN/mm
1	BI	11	8,95	1,43	-	6,26
2	BII	11,5	11,68	1,12	0,88	13,07
3	BIII	10	11,94	0,87	1,22	8,20

4.2 Hasil Pengujian Beban dan Lendutan Maksimum Balok Eksisting Tanpa Perkuatan (Balok Kontrol) dengan Balok dengan Perkuatan Deep Embedment (DE)

Perbandingan hasil beban dan lendutan maksimum pada balok yang diperkuat dengan hasil beban dan lendutan maksimum pada balok tanpa perkuatan mengalami perbedaan yang cukup besar. Berikut ini merupakan perbandingan hasil beban dan lendutan maksimum balok dengan perkuatan dan balok tanpa perkuatan dapat dilihat pada Tabel 3. berikut.

Tabel 3. Perbandingan Beban dan Lendutan Maksimum Balok Eksisting dengan perkuatan dan Tanpa Perkuatan

No	Kode Sampel	Beban Maksimum		Lendutan	Persentase Kenaikan Beban	
		Eksperimen (kN)	SNI (kN)	Mm	Eksperimen (%)	SNI (%)
1	BI	30	24,914	17,24	0	0
2	BII	43	42,106	13,00	43	69,00
3	BIII	42	41,250	14,50	40	65,57



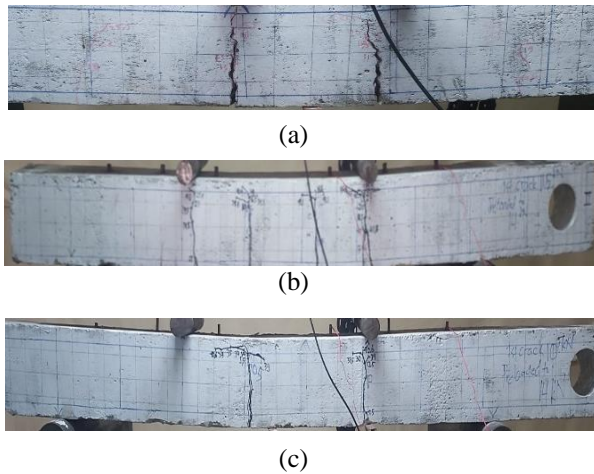
Gambar 6. Perbandingan Beban dan Lendutan Maksimum Balok dengan Perkuatan dan Balok Tanpa Perkuatan

Berdasarkan Gambar 6. dapat dilihat bahwa balok yang diperkuat memiliki beban dan lendutan maksimum yang lebih besar dari pada beban dan lendutan maksimum balok tanpa perkuatan. Kemudian, dari Tabel 3. terdapat selisih beban dan lendutan maksimum hasil pengujian balok yang diperkuat dengan balok tanpa perkuatan dengan balok eksisting II dengan perkuatan DE (BII) sebesar 52,94 % dan 26,85 % dan balok eksisting III dengan perkuatan DE (BIII) sebesar 45,10 % dan 42,59 % .Peningkatan yang terjadi pada lendutan balok yang diperkuat diiringi dengan tulangan baja yang mulai luluh dan regangannya makin bertambah walaupun tidak ada penambahan beban uji. Kondisi seperti ini yang membuat lendutan balok akan bertambah secara cepat, dikarenakan beton pada daerah tarik mengalami kehilangan kuat tariknya dan tulangan baja mulai bekerja secara efektif memikul gaya tarik yang terjadi. Beda halnya dengan balok tanpa perkuatan, balok tanpa perkuatan memiliki lendutan yang lebih kecil jika dibandingkan lendutan pada balok yang diperkuat. Hal ini disebabkan karena tulangan baja mencapai kuat luluh sebelum beton mencapai kuat maksimumnya. Pada balok eksisting dengan perkuatan DE memiliki tipe kerusakan lentur.

4.3 Pola Retak Balok Eksisting Tanpa Perkuatan dan Balok Eksisting dengan Perkuatan Deep Embedment (DE)

Hasil pengujian eksperimental balok eksisting dengan perkuatan DE II (BII) diperoleh beban pada saat retak pertama sebesar 11,5 kN dengan lendutan sebesar 1,12 mm dan hasil pengujian eksperimental balok eksisting dengan perkuatan DE III (BIII) diperoleh beban pada saat retak pertama sebesar 10 kN dengan lendutan sebesar 0,87 mm. Sedangkan pada pengujian balok tanpa perkuatan diperoleh beban pada saat reatak pertama sebesar 11 kN dengan lendutan sebesar 1,43 mm. Setelah itu, spesimen diturunkan dan dilakukan sistem perkuatan. Kemudian, pembebanan dilanjutkan sampai balok runtuh pada fase kedua. Ditemukan bahwa tidak ada retakan diagonal yang signifikan pada balok yang diperkuat. Pengembangan retakan selama fase beban kedua identik dengan yang pertama. Retakan yang dikembangkan melebar ketika

pemuatan meningkat, dan spesimen akhirnya runtuh dengan kegagalan lentur dengan beban 43 kN pada balok BII dan beban 42 kN pada balok BIII. Perbandingan pola retak balok yang diperkuat dengan balok tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 7. berikut.



Gambar 7. Perbandingan Pola Retak (a) Balok Eksisting Tanpa Perkuatan (Kontrol), (b) Balok dengan Perkuatan DE (BII) dan (c) Balok dengan Perkuatan DE (BIII)

4.4 Hasil Perbandingan Perhitungan Eksperimental dan SNI 03-2847-2019 Kapasitas Geser Balok Beton Eksisting Tanpa Perkuatan dengan Perkuatan Deep Embedment (DE)

Hasil perhitungan kapasitas geser dari pengujian eksperimental dengan hitungan SNI 03-2847-2019 pada balok beton tanpa perkuatan dan balok beton eksisting dengan perkuatan *deep embedment* sesuai dengan rumus pada tinjauan pustaka berikut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Kapasitas Geser Balok Beton Eksisting Eksperimental dan SNI 03-2847-2019

No	Kode Sampel	Hasil Eksperimental	Hitungan SNI
		V_u kN	ϕV_n kN
1	BI	15	20,143
2	BII	21,5	43,729
3	BIII	21	30,640

Metode penambahan tulangan vertikal ke dalam penampang balok memberikan pengaruh terhadap kapasitas geser balok karena dapat meningkatkan kapasitas geser nominal balok, sehingga dapat mencegah terjadinya keruntuhan geser dari balok dengan kekurangan kapasitas geser. Oleh karena itu balok yang diperkuat dengan metode *Deep Embedment* mampu meningkatkan kapasitas geser balok beton bertulang.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil eksperimental menunjukkan, bahwa kontribusi batang baja yang tertanam di inti balok RC terhadap kapasitas beban bisa menjadi signifikan. Kekakuan awal tertinggi dari balok yang diperkuat adalah 13.07 kN/mm pada balok BII dengan perkuatan batang tertanam (DE) Ø12 mm yang 69% lebih tinggi dari balok control. Sedangkan beban maksimum balok yang diperkuat adalah 43 kN, yang 43% lebih tinggi dari balok kontrol. Beban – lendutan ultimate dari balok yang diperkuat adalah 43 kN dengan lendutan pada 13,00 mm, yang 43,33% lebih tinggi dari balok kontrol. Pengembangan retakan selama fase beban kedua dari balok yang diperkuat identik dengan yang pertama. Retakan yang dikembangkan melebar ketika pemuatan meningkat dan spesimen akhirnya runtuh dengan cara yang lentur. Kapasitas geser nominal balok yang diperkuat adalah 43,729 kN, yang tertinggi pada penanaman batang DE Ø12 mm dari balok kontrol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih peneliti ucapkan kepada Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau yang telah memberikan dukungan, sehingga terselesainya paper ini. Serta kepada seluruh dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan masukan dan bimbingan dalam pengerjaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Valerio, T. J. Ibell, dan A. P. Darby, “Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 162, no. 5, hal. 311–321, 2009.
- [2] Ridwan, S. Dirar, Y. Jemaa, A. Kamaldi, dan A. Kurniawandy, “Strengthening of Reinforced Concrete Beam Subjected to Shear Loading using Deep Embedment Method,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1655, no. 1, 2020.
- [3] A. Yolanda, Z. Djauhari, dan R. Ridwan, “Keruntuhan Progresif Gedung Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan.” Riau University.
- [4] M. Rizki, R. Rahman, dan A. Kamaldi, “Analisis Perilaku Balok Beton Bertulang Tanpa Tulangan Geser Melalui Pemodelan Elemen Hingga,” vol. 39, no. 1, hal. 4–8, 2020.
- [5] SNI 2847-2019, “Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan Sebagai Revisi Dari Standar Nasional Indonesia. SNI 03-2847:2019,” *Sni 28472019*, no. 8, hal. 1–695, 2019.
- [6] SNI 4431:2011, “Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan,” *SNI 4431-2011*, hal. 16, 2011.
- [7] E. G. Nawy, “Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar (T. Surjaman (ed.); Kedua),” 2010.
- [8] O. Chaallal, A. Mofidi, dan M. Asce, “Shear

Strengthening of RC Beams with EB FRP : Influencing Factors and Conceptual Debonding Model,” no. February, hal. 62–74, 2011.

- [9] R. Rahman, S. Dirar, Y. Jemaa, M. Theofanous, dan M. Elshafie, “Experimental Behavior and Design of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints Strengthened with Embedded Bars,” *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 6, hal. 04018047, 2018.
- [10] W. M. Nurhud, R. Rahman, dan A. Kamaldi, “Pemodelan Elemen Hingga Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode Deep Embedment,” vol. 39, no. 1, hal. 4–8, 2020.