

TINJAUAN PERILAKU DINAMIK BALOK T DENGAN PERKUATAN *CFRP* JENIS *WRAP* (STUDI EKSPERIMENTAL, BALOK BETON BERTULANG)

REVIEW OF BEAM DYNAMIC BEHAVIOR WITH *WRAP* TYPE STRENGTHENING *CFRP* (EXPERIMENTAL STUDY, REINFORCED CONCRETE BEAMS)

Johanes B. Muda¹⁾, B. Supriyadi²⁾, Musliikh³⁾, and S. Siswosukarto⁴⁾

¹⁾Departement of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika, Kampus No.2, Senolowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55284

Email: johanes.muda@gmail.com

²⁾ Departement of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika, Kampus No.2, Senolowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55284

³⁾ Departement of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika, Kampus No.2, Senolowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55284

⁴⁾ Departement of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika, Kampus No.2, Senolowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55284

ABSTRAK

Penggunaan *CFRP* sebagai pilihan dalam revitalisasi komponen struktur saat ini sangat banyak digunakan dan di kembangkan. Penggunaan *CFRP* bertujuan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok, namun pada penerapannya penambahan *CFRP* berpengaruh terhadap perubahan kekakuan dan pola keruntuhan balok tersebut. Perilaku dinamik dari komponen struktuktur dalam penelitian ini digambarkan oleh nilai frekuensi alami komponen struktur dalam pengujian lentur dan geser. Penelitian ini menggunakan enam buah benda uji yaitu tiga benda uji balok T dengan perkuatan *CFRP wrap* pengujian lentur (BC_1 , BFR_1 , BFR_2) dan tiga benda uji balok T dengan perkuatan *CFRP wrap* pengujian geser (BC_g , $BC1_g$, $BC2_g$). Dari hasil pengujian, penambahan perkuatan *CFRP* meningkatkan nilai frekuensi alami benda uji BFR_1 , BFR_2 , $BC1_g$, $BC2_g$ berturut-turut sebesar 41.29%, 42.86%, 10.34%, 15%. Peningkatan frekuensi alami ini juga divalidasi dengan adanya peningkatan kekakuan benda uji BFR_1 , BFR_2 , $BC1_g$, $BC2_g$ berturut-turut sebesar 2.08%, 20.50%, 65.68%, 107.2%. Dari hasil pengujian lentur benda uji tanpa perkuatan (BC_1) mengalami penurunan nilai frekuensi dari kondisi awal ke kondisi runtuh sebesar 29.8%, lebih besar dari benda uji dengan perkuatan BFR_1 (10.33%) dan BFR_2 (20.13%). Sedangkan pada pengujian geser benda uji tanpa perkuatan (BC_g) mengalami penurunan nilai frekuensi dari kondisi awal ke kondisi runtuh sebesar 9.58%, lebih besar dari benda uji dengan perkuatan $BC1_g$ (7.10%) dan $BC2_g$ (6.74%). Dari data hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa terdapat peningkatan nilai frekuensi alami balok T dan penambahan kekakuan balok T akibat adanya penambahan perkuatan *CFRPwrap* pada balok T yang mana dalam kondisi awal hanya bertujuan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok T tersebut.

Kata kunci: *CFRP*, Balok T, Frekuensi alami, Perkuatan

ABSTRACT

The use of *CFRP* as an option in the revitalization of the components of the current structure is very widely used and developed. The use of *CFRP* aims to increase the bending and shear capacity of the beam, but in its application the addition of *CFRP* affects changes in the stiffness and pattern of the beam's collapse. The dynamic behavior of the components in this study is illustrated by the natural frequency value of structural components in bending and shear testing. The study used six test objects, that is three T beam test objects with *CFRPwrap* of bending testing. (BC_1 , BFR_1 , BFR_2) and three T beam test objects with *CFRPwrap* of shear testing (BC_g , $BC1_g$, $BC2_g$). From the test results, the addition of *CFRP* strengthener increases the natural frequency value of BFR_1 test objects, BFR_2 , $BC1_g$, $BC2_g$ consecutively by 41.29%, 42.86%, 10.34%, 15%. This increase in natural frequency was also validated by an increase in the stiffness of BFR_1 , BFR_2 , $BC1_g$, $BC2_g$ test objects consecutively by 2.08%, 20.50%, 65.68%, 107.2%. From the results of bending test objects without strengthened (BC_g) decreased the frequency value from the initial condition to the collapse conditions by 29.8%, this value greater than the test object with the strengthened BFR_1 (10.33%) and BFR_2 (20.13%). Meanwhile, in unstrengthened test object of shear test (BC_g) experienced a decrease in natural frequency value from the initial condition to a collapse condition by 9.58%, this value greater than the test object with *CFRP* test object $BC1_g$ (7.10%) and $BC2_g$ (6.74%). From the data of this test result can be concluded that there is an increase in the natural frequency value of the T beam and the addition of stiffness of the T beam due to the addition of *CFRPwrap* strengthener on the T beam which in the initial condition only aims to increase the bending and shear capacity of the T beam.

Keywords: *CFRP*, T Beam, The Natural Frequency, strengthening

PENDAHULUAN

Penggunaan *Fiber Reinforced Plastic* sebagai pilihan dalam revitalisasi komponen struktur saat ini sangat banyak digunakan dan dikembangkan. Dilihat dari kemudahan instalasi di lapangan dan bahan yang ringan namun memiliki kekuatan yang baik sebagai bahan retrofit membuat *FRP* banyak diminati sebagai solusi utama ketika waktu dan lokasi khusus sebagai kebutuhan utamanya. Ada beberapa jenis *FRP* yang digunakan sebagai bahan retrofit, namun yang sering digunakan sebagai perkuatan balok yaitu *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Penggunaan *FRP* sebagai bahan perkuatan komponen struktur di Indonesia masih sangat kekurangan informasi, terutama *code SNI* saat ini yang belum secara khusus mengatur penggunaan *FRP*. Saat ini *code* yang digunakan sebagai acuan dalam penggunaan *FRP* merujuk pada *ACI 440*.

FRP yang digunakan dalam penelitian ini berupa *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) wrap* yang digunakan sebagai perkuatan untuk balok T pada pengujian lentur dan geser. Perkuatan ini dimaksudkan dengan tujuan awal untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser, namun penelitian ini meninjau frekuensi alami dan kekakuan untuk mengetahui pengaruh perkuatan ini terhadap perilaku dinamik balok tersebut. Apakah ada perubahan perilaku dinamik terhadap penggunaan *CFRP* sebagai perkuatan pada balok T? Atau adakah pengaruh penggunaan *CFRP* terhadap kekakuan balok T tersebut? Dalam mengumpulkan informasi mengenai perkuatan struktur menggunakan *CFRP* dilakukan penelitian secara eksperimen untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari perkuatan itu terhadap kekakuan dan perilaku dinamik Balok T itu sendiri. Hal ini menjadi dasar dilakukannya penelitian ini. Pada akhirnya kajian ini diharapkan dapat memberikan informasi tambahan yang berguna dalam pertimbangan penggunaan *CFRP* sebagai bahan perkuatan struktur.

Arjanto (2002) melakukan penelitian tentang perilaku dinamik balok beton bertulang retrofit dengan *CFRP wrap*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku frekuensi alami balok yang diperkuat sama dengan balok bertulang biasa dimana frekuensi alami balok rusak lebih rendah dari balok utuh. Perilaku rasio redaman balok yang diperkuat sama dengan balok beton bertulang biasa, dimana redaman balok rusak lebih besar dibanding dengan balok utuh. Nilai frekuensi alami dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

dimana :

f =frekuensi alami (Hz)

k =kekakuan struktur (N/mm)

m =massa dari struktur (N.s²/mm)

Han Ay Lie dkk (2018) dalam penelitiannya terkait penggunaan *CFRP* (*wrap*) pada balok beton bertulang dengan penampang T, menunjukkan bahwa kapasitas pemikulan balok meningkat 62 % pada balok dengan perkuatan *FRP* yang gagal akibat putusnya *FRP*, dan 47 % pada balok dengan perkuatan *FRP* yang runtuh karena *de-bonding FRP*. Lepasnya ikatan antara lembaran *FRP* dengan beton menurunkan kapasitas pemikulan sebesar 15 %.

Mesay A. Endeshaw dkk (2008) dalam penelitian *Retrofit Of Rectangular Bridge Columns Using CFRP Wrapping* menunjukkan bahwa dengan menggunakan *CFRP wrap* pada retrofit meningkatkan performa seismic dari struktur eksisting Hasil penelitian ini memberikan dasar untuk mengevaluasi dan meningkatkan kinerja seismik kolom jembatan persegi panjang yang ada di Negara Bagian Washington. Untuk retrofiting kolom persegi panjang, disarankan agar jaket berbentuk oval digunakan bila memungkinkan. Jaket oval dapat disediakan dengan bahan baja atau *CFRP*. Kedua jenis jaket memberikan tingkat kurungan yang sebanding yang membatasi strain lingkaran melintang hingga di bawah 1000 mikrostrain dan yang menghasilkan kolom daktail. Kinerja, detail dan prosedur untuk desain jaket baja berbentuk oval disediakan dalam *FHWA Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges* (2006). Pedoman desain untuk jaket *CFRP berbentuk oval* diberikan dalam *ACTT-95/08* (Seible et al., 1995).

Januar dan Triwiyono (2003) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penggunaan *CFRP* sebagai perkuatan kolom yang dipasang dengan arah serat radial (*carbon fibre jacket*) menunjukkan bahwa kemampuan kolom tersebut dalam menahan beban lateral meningkat 75.566% (pada balok serupa dengan beban geser).

Cosmas (2015) melakukan penelitian tentang perilaku dinamik pelat lantai semi precast. menyimpulkan ada perbedaan frekuensi alami dari tiap jenis pelat pada kondisi sebelum dibebani yaitu pelat monolit sebesar 14,84 Hz, Pelat komposit tanpa shear connector sebesar 13,45 Hz, Pelat komposit jarak antar shear connector $L/4(100) - L/2(150) - L/4(100)$ sebesar 13,62 Hz, Pelat komposit jarak antar shear connector $L/3(100) - L/3(150) - L/3(100)$ sebesar 13,46 Hz dan Pelat komposit jarak antar shear connector 100 mm sebesar 15,97 Hz dan juga ada penurunan frekuensi alami seiring besarnya penurunan frekuensi alami. Displacement mode pelat utuh lebih kecil dibandingkan pelat rusak dan displacement mode terbesar terjadi pada tengah bentang, curvature mode dan beda absolut curvature mode menunjukkan adanya kerusakan pada pelat. Pola retak yang terjadi pada pelat monolit dan komposit umumnya retak lentur dan terjadi ditengah bentang.

Widorini (2012) melakukan pengujian dinamik pada panel pelat lantai monolit dan komposit. Hasil pengujian

oleh Widorini menunjukkan bahwa Pelat Monolit lebar 200 (pelat cast in situ) dan pelat Komposit lebar 200 (pelat semi precast) memiliki frekuensi alami yang sama yaitu 16,17 Hz. Pada pelat Monolit lebar 400 (pelat cast in situ) memiliki frekuensi alami 16,94 Hz dan pelat komposit lebar 400 (pelat semi precast) memiliki frekuensi alami 15,87 Hz, penurunan frekuensi alami sebesar 6,32%. Pelat komposit mengalami penurunan frekuensi alami 1,86% dengan bertambahnya panel sedangkan pada pelat monolit naik 4,76%. Hasil eksperimen mode displacement menunjukkan hasil bahwa pelat yang ada kerusakan mempunyai displacement lebih besar. *Curvature mode* cukup dapat menunjukkan indentifikasi adanya kerusakan. Pola retak yang terjadi untuk pelat monolit maupun pelat precast dimulai di daerah tengah bentang dan pada beban maksimum pola retak saat runtuh mengalami kegagalan lentur.

Penelitian oleh **Tuhuteru** (2013) meninjau pengaruh dari jarak dan penambahan *shear connector* terhadap perilaku dinaik pada pelat lantai monolit dan komposit. Hasil pengujian pada penelitian ini mendapatkan bahwa PM400, PK400-SC100 dan PK400-SC200 kondisi pelat utuh memiliki frekuensi alami yang sama yaitu 15,5 Hz, sedangkan PK400-SC300 memiliki frekuensi alami 14,77 Hz, dan PM400-TSC kondisi pelat utuh memiliki frekuensi alami yaitu 14,53 Hz. Frekuensi alami sistem struktur pelat rusak mengalami penurunan frekuensi alami pada pelat monolit maupun pelat komposit. Kondisi ini diakibatkan karena terjadinya penurunan kekakuan pada pelat akibat kerusakan.

Pada aplikasinya **CFRP membutuhkan epoxy** sebagai perekat (*adhesive layer*) agar balok dan CFRP dapat bersifat komposit. Kekakuan geser (K_s) dan kekakuan normal (K_n) dari adhesive layer dapat dianalisa dengan model Ziraba et al (1994).

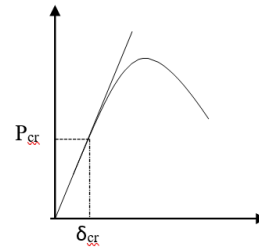
$$K_s = \frac{G_a b_a}{t_a} \quad (2)$$

$$K_n = \frac{E_a b_a}{t_a} \quad (3)$$

Dimana :

- E_a = Modulus elastisitas
- G_a = Modulus Geser
- b_a = Lebar *adhesive layer*
- t_a = Tebal *adhesive layer*

Kekakuan menurut Gere dan Timoshenko (1987) didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan sebesar satu satuan, nilai kekakuan merupakan kemiringan garis dari hubungan antara beban dan lendutan,



Gambar 1. Grafik pendekatan kekakuan.

Nilai kekakuan dapat dihitung berdasarkan rasio beban dan lendutan.

$$K = \frac{P_{cr}}{\delta_{cr}} \quad (4)$$

Dimana :

P_{cr} = Beban pada saat *firstcrack*

δ_{cr} = lendutan pada saat *firstcrack*

Kerusakan struktur akan mempengaruhi matrik kekakuan sedangkan matrik massa adalah tetap, sehingga kerusakan balok dapat dideteksi dengan berubahnya karakteristik dinamis balok, yaitu menurunnya frekuensi alami dan berubahnya ragam alami getaran. Persamaan untuk menyelesaikan masalah tersebut dikenal dengan persamaan eigen problem sebagai berikut:

Pada balok utuh :

$$[K_s] - \omega^2 [M_s] \{\alpha\} = \{0\} \quad (5)$$

Pada balok rusak :

$$[[K']_s] - [(\omega')^2 [M_s] \{\alpha'\} = \{0\} \quad (6)$$

Dimana:

K_s = matrik kekakuan sistem utuh

K'_s = matrik kekakuan sistem rusak

M_s = matrik masa sistem utuh atau rusak

ω = frekuensi alami sistem utuh

ω' = frekuensi alami sistem rusak

α = mode dari sistem utuh

α' = mode dari sistem rusak

Analisis tegangan dan regangan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

untuk kondisi elastis,

$$f_y = \epsilon \times E, \quad (7)$$

Sedangkan untuk kondisi strain hardening (f_s) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$F_s = F_y [(mp+2)/(60p+2) + p(60-m)/2n] \quad (8)$$

$$m = [n(F_{su}/F_y) - 60q - 1] / (15q^2) \quad (9)$$

$$n = (30q+1)^2$$

$$p = \epsilon_s - \epsilon_{sh}$$

$$q = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh}$$

Dimana :

F_y = Tegangan leleh baja (N/mm²)

F_s = Tegangan strain hardening baja (N/mm²)

F_{su} = Tegangan ultimit baja (N/mm²)

ϵ_{su} = Regangan ultimit baja

ϵ_{sh} = Regangan strain hardening baja

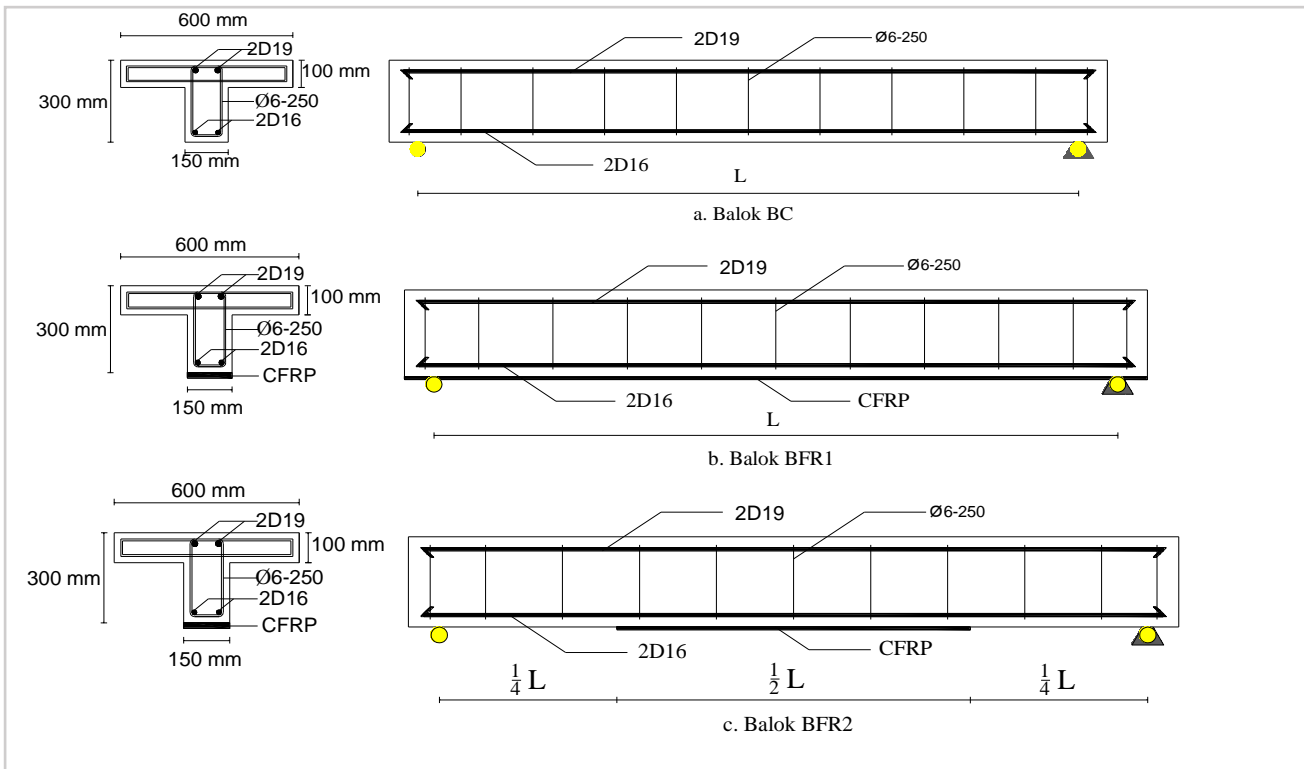
ϵ = Regangan baja

E = Modulus elastisitas baja (N/mm²)

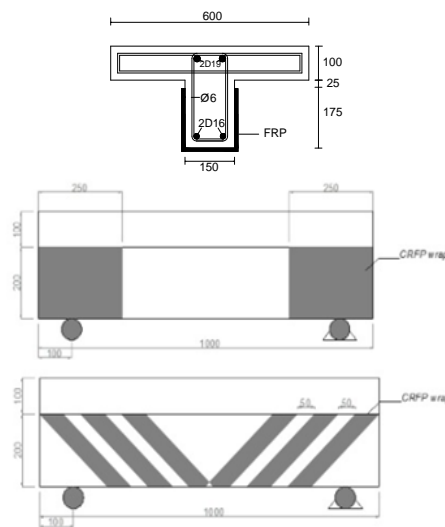
METODE

Benda uji berupa balok beton bertulang tampang T dengan jumlah 6 benda uji. 3 benda uji pengujian lentur dan 3 benda uji pengujian geser. Masing-masing pengujian memiliki Satu benda uji digunakan sebagai balok kontrol dengan kode BC₁ untuk pengujian lentur dan BC_g untuk pengujian geser. Dua benda uji masing-masing pengujian diberikan perkuatan

dengan *CFRPwrap* yaitu BFR₁ (perkuatan lentur sepanjang bentang), BFR₂ (perkuatan lentur sepanjang setengah bentang), BC1g (perkuatan geser pada area geser model U-wrap) dan BC2g (perkuatan geser pada area geser model U-strip sudut 45°). Benda uji balok T dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 2. Benda Uji Balok T Pengujian Lentur.



Gambar 3. Benda Uji Balok T Pengujian Geser.

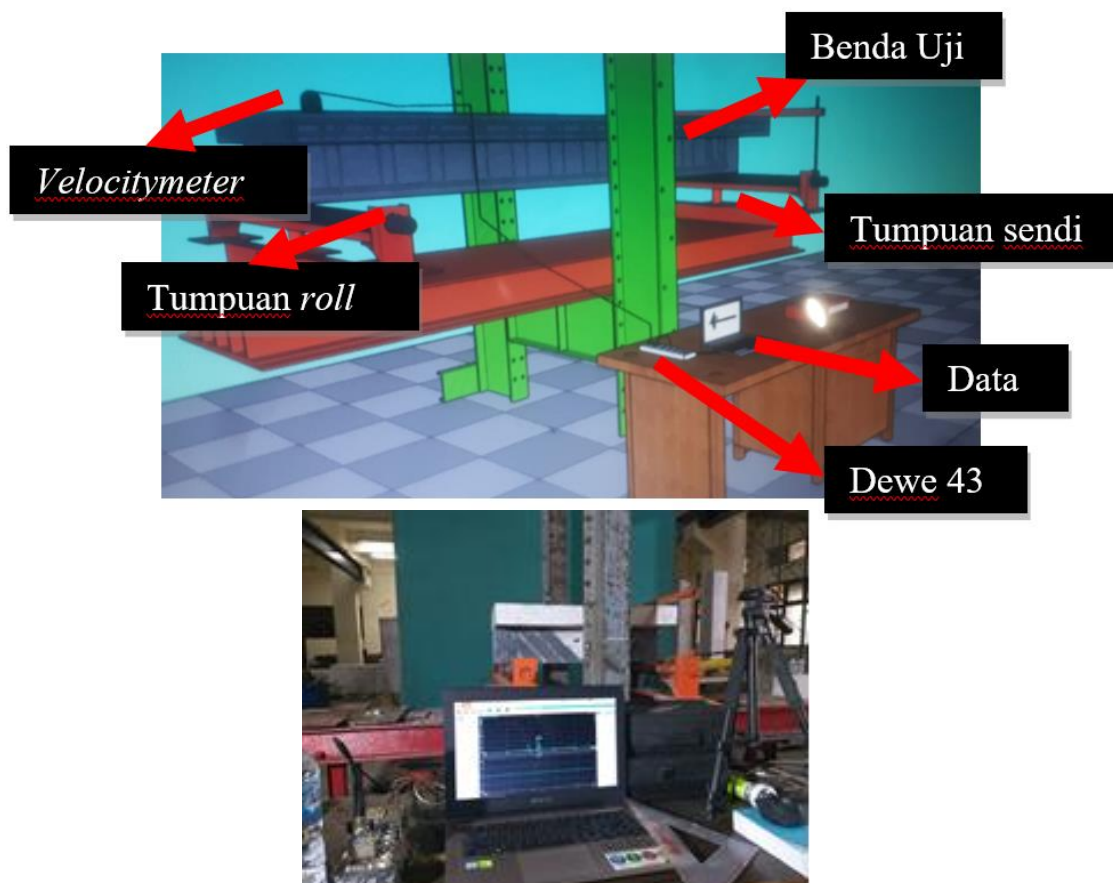
Mutu beton yang digunakan adalah 29,04 MPa. Perkuatan *CFRPwrap* menggunakan Sika *Wrap 231C* dan *epoxy* antara beton dengan *CFRP* menggunakan Sikadur 330 dari produk SIKA. Pengujian dilakukan setelah beton berumur lebih dari 28 hari. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan getaran bebas (*free vibration*) pada struktur dengan cara memukul benda uji secara perlahan-lahan. Hasil dari getaran tersebut diambil dengan *velocitymeter* yang diletakkan pada salah satu titik pada permukaan balok dan dihubungkan dengan program Dewe pada komputer. Data berupa rekaman getaran-waktu. Pengujian ini dilakukan dengan 4 kondisi pengujian untuk setiap specimen baik lentur maupun geser.

Adapun tahapan pengujian yaitu:

- 1) Pengujian frekuensi kondisi awal
- 2) Pembebanan statis hingga *firstcrack*.

- 3) Pengujian frekuensi kondisi *firstcrack*.
- 4) Instalasi perkuatan *CFRP*
- 5) Pengujian frekuensi kondisi *CFRP*
- 6) Pemberian beban statis berulang
- 7) Pembebanan statis hingga runtuh
- 8) Pengujian frekuensi kondisi Runtuh

Set up pengujian ditunjukkan pada Gambar 3, metode pembebanan dilakukan 2 titik pada pengujian lentur dengan tujuan tidak ada pengaruh tegangan geser pada tengah bentang. Dan pembebanan 1 titik pada pengujian geser. Beban yang diterima oleh balok dibaca oleh load cell, deformasi pada balok akan dibaca oleh LVDT (*Linier Vertical Displacement Transducer*), regangan pada beton akan dibaca oleh strain gauge tipe KC-70-A1-11 dan regangan pada baja akan dibaca oleh strain gauge tipe N11-FA-8-120-11.



Gambar 4. Setting Up Pengujian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Frekuensi Alami

Hasil pengujian frekuensi balok T berupa rekaman dengan data frekuensi setiap satuan waktu. Data ini kemudian dianalisis FFT dan difilter untuk memudahkan pembacaan antara frekuensi alami dan *noise*. Contoh data rekaman dapat dilihat pada Gambar 4. Perkuatan *CFRP* pada balok

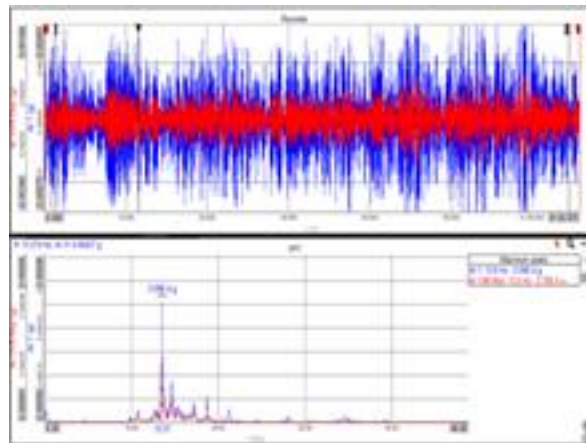
T dapat meningkatkan nilai frekuensi alami balok tersebut. Penambahan perkuatan ini juga meningkatkan kekakuan balok T. Setelah terjadinya *demage* pada saat *firstcrack* frekuensi alami dan kekakuan balok T menurun. Hal ini sejalan dengan penelitian-penelitian lain yang menyatakan penurunan frekuensi alami meningkat dengan

pertambahan kerusakan pada balok. Setelah penurunan frekuensi alami dan kekakuan ini balok diperkuat dengan *CFRPwrap* pada 4 benda uji. Hasil pengujian pada 4 benda uji ini menunjukkan bahwa penambahan perkuatan *CFRP* meningkatkan nilai frekuensi alami yang

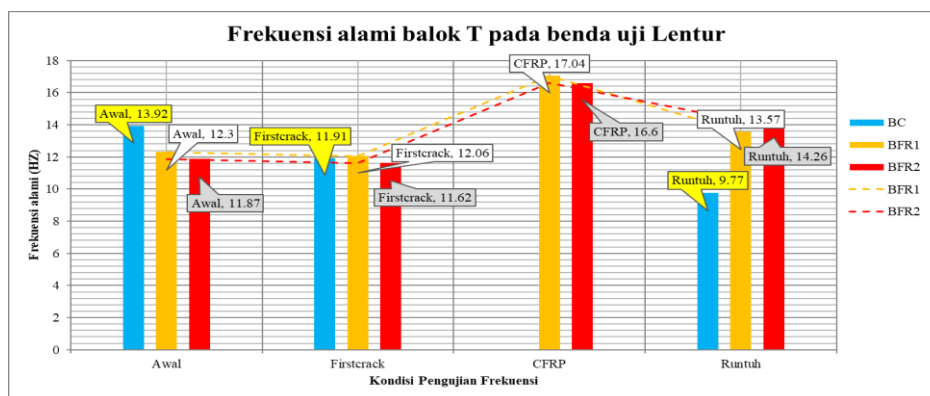
sebelumnya turun akibat bertambahnya *damage*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Table 1 dan Gambar di bawah ini.

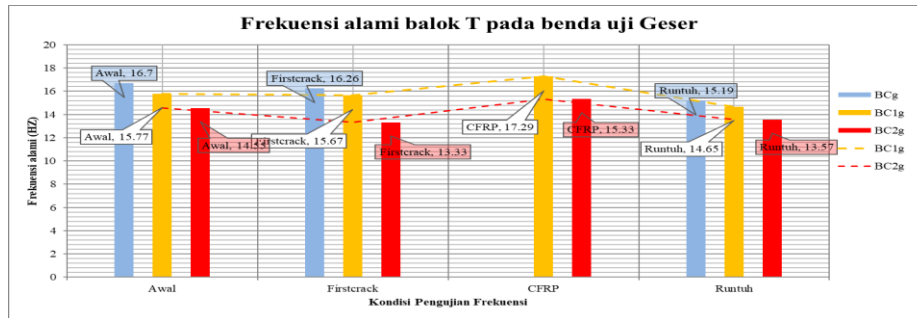
Tabel 1. Hasil Pengujian Frekuensi

No	Benda Uji Balok T	Panjang (L) mm	1/4 L mm	Frekuensi Alami (Hz)				Keterangan
				Kondisi Pengujian				
				Awal	First Crack	CFRP	Runtuh	
1	BC ₁	2500	625	13.92	11.91	-	9.77	Benda Uji lentur
2	BFR ₁	2500	625	12.3	12.06	17.04	13.57	Benda Uji lentur
3	BFR ₂	2500	625	11.87	11.62	16.6	14.26	Benda Uji lentur
4	BC _g	1000	250	16.8	16.26	-	15.19	Benda Uji geser
5	BC _{1g}	1000	250	15.77	15.67	17.29	14.65	Benda Uji geser
6	BC _{2g}	1000	250	14.55	13.33	15.33	13.57	Benda Uji geser



Gambar 5. Hasil *Record* dan Analisis FFT Balok BC_{2g} Kondisi Runtuh



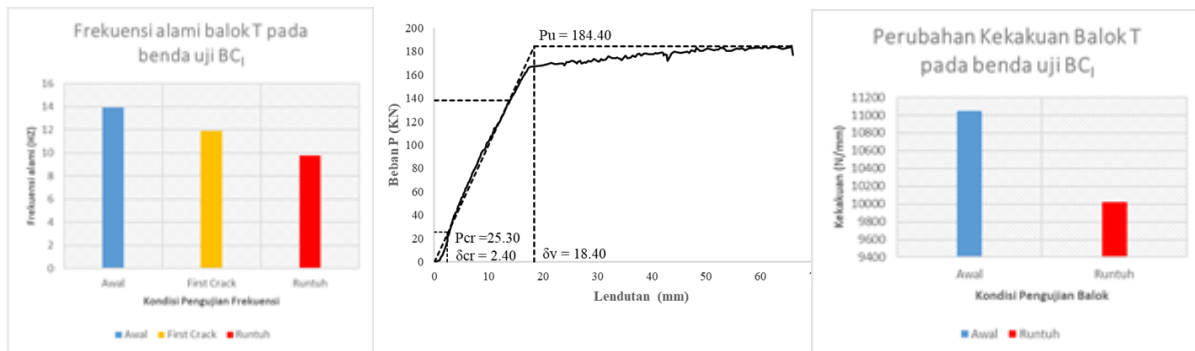


Gambar 6. Hasil Pengujian Frekuensi Alami Benda Uji Setiap Kondisi

1. Balok kontrol lentur (BC₁)

Dari table 1 diketahui bahwa pada balok BC₁ selama pengujian mengalami perubahan frekuensi pada setiap kondisi pengujian. Semakin besar kerusakan pada balok T semakin kecil frekuensi alami balok tersebut. Hal ini

sejalan dengan perubahan kekakuan pada balok tersebut yang dianalisis dari grafik tegangan-regangan balok BC₁. Perubahan frekuensi pada balok BC₁ selama pengujian, grafik tegangan regangan dan perubahan kekakuan balok BC₁ dapat dilihat pada Gambar 7.

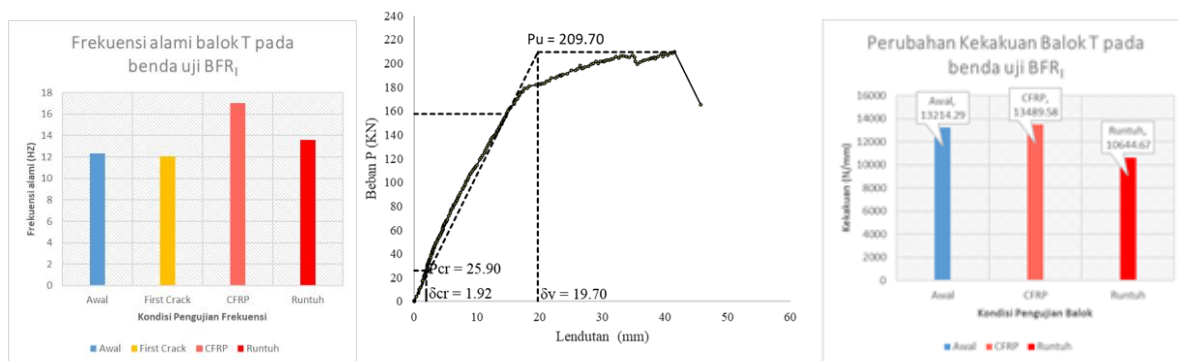


Gambar 7. Hasil Analisa Pengujian Benda Uji BC₁

2. Balok BFR₁

Dari table 1 diketahui bahwa pada balok BFR₁ selama pengujian mengalami perubahan frekuensi pada setiap kondisi pengujian. Dengan adanya penambahan CFRPwrap frekuensi balok yang sebelumnya menurun akibat retak awal mengalami peningkatan. Hal ini sejalan

dengan perubahan kekakuan yang ditunjukkan pada balok tersebut yang dianalisis dari grafik tegangan-regangan balok BFR₁. Perubahan frekuensi pada balok BFR₁ selama pengujian, grafik tegangan regangan dan perubahan kekakuan balok BFR₁ dapat dilihat pada Gambar 8.

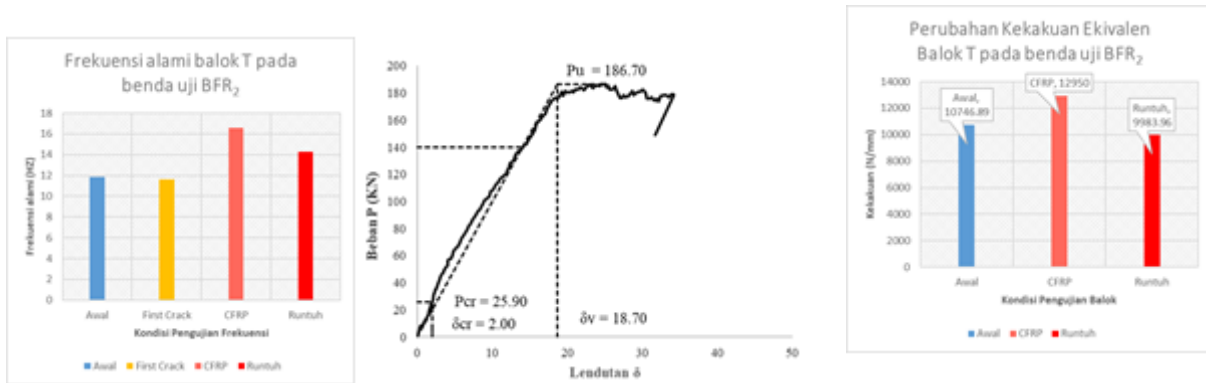


Gambar 8. Hasil Analisa Pengujian Benda Uji BFR₁

3. Balok BFR₂

Dari table 1 diketahui bahwa pada balok BFR₂ selama pengujian mengalami perubahan frekuensi pada setiap kondisi pengujian. Dengan adanya penambahan *CFRPwrap* frekuensi balok yang sebelumnya menurun akibat retak awal mengalami peningkatan. Hal ini sejalan

dengan perubahan kekakuan yang ditunjukkan pada balok tersebut yang dianalisis dari grafik tegangan-regangan balok BFR₂. Perubahan frekuensi pada balok BFR₂ selama pengujian, grafik tegangan-regangan dan perubahan kekakuan balok BFR₂ dapat dilihat pada Gambar 9.

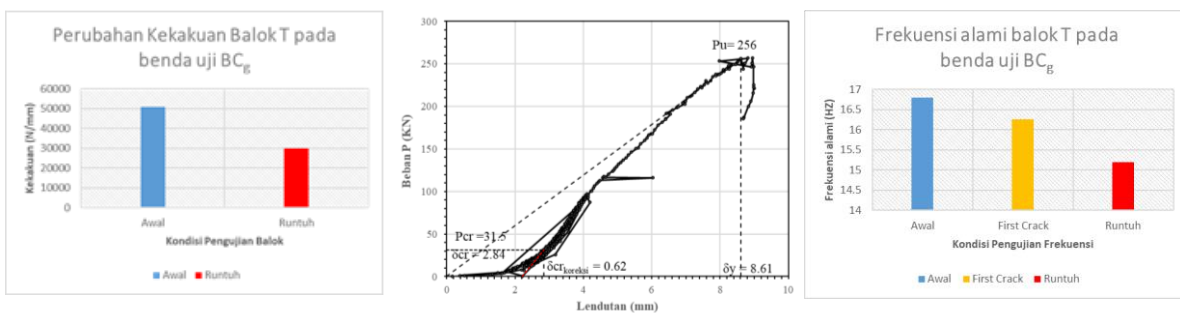


Gambar 9. Hasil Analisa Pengujian Benda Uji BFR₂

1. Balok kontrol lentur (BC_g)

Dari table 1 diketahui bahwa pada balok BC_g selama pengujian mengalami perubahan frekuensi pada setiap kondisi pengujian. Semakin besar kerusakan pada balok T semakin kecil frekuensi alami balok tersebut. Hal ini

sejalan dengan perubahan kekakuan pada balok tersebut yang dianalisis dari grafik tegangan-regangan balok BC_g. Perubahan frekuensi pada balok BC_g selama pengujian, grafik tegangan regangan dan perubahan kekakuan balok BC_g dapat dilihat pada Gambar 10.

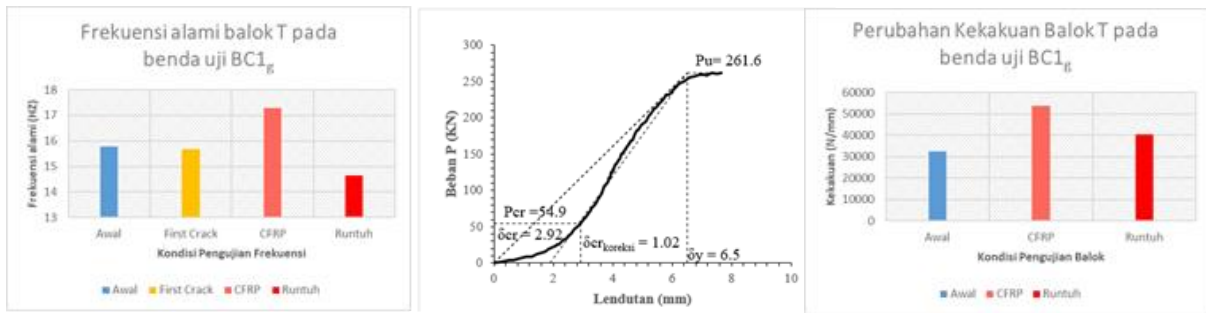


Gambar 10. Hasil Analisa Pengujian Benda Uji BC_g

2. Balok BC_{1g}

Dari table 1 diketahui bahwa pada balok BC_{1g} selama pengujian mengalami perubahan frekuensi pada setiap kondisi pengujian. Dengan adanya penambahan *CFRPwrap* frekuensi balok yang sebelumnya menurun akibat retak awal mengalami peningkatan. Hal ini sejalan

dengan perubahan kekakuan yang ditunjukkan pada balok tersebut yang dianalisis dari grafik tegangan-regangan balok BC_{1g}. Perubahan frekuensi pada balok BC_{1g} selama pengujian, grafik tegangan regangan dan perubahan kekakuan balok BC_{1g} dapat dilihat pada Gambar 11.

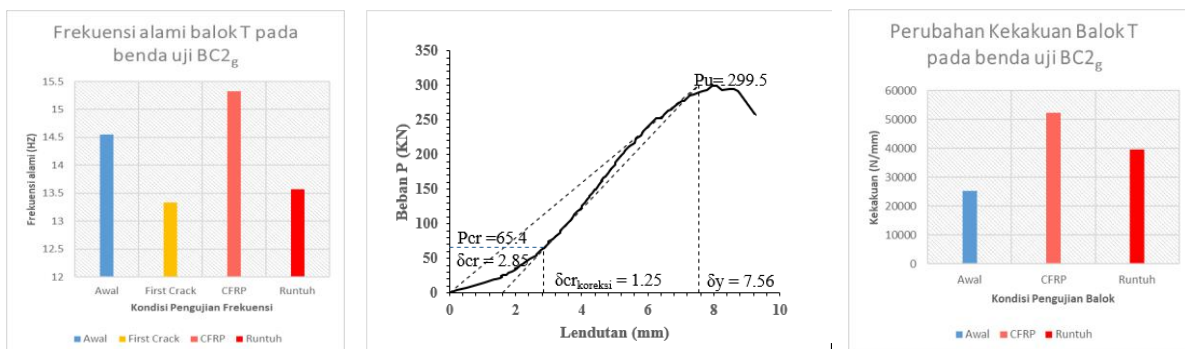


Gambar 11. Hasil Analisa Pengujian Benda Uji BC1_g

3. Balok BC2_g

Dari table 1 diketahui bahwa pada balok BC2_g selama pengujian mengalami perubahan frekuensi pada setiap kondisi pengujian. Dengan adanya penambahan *CFRPwrap* frekuensi balok yang sebelumnya menurun akibat retak awal mengalami peningkatan. Hal ini sejalan

dengan perubahan kekakuan yang ditunjukkan pada balok tersebut yang dianalisis dari grafik tegangan-regangan balok BC2_g. Perubahan frekuensi pada balok BC2_g selama pengujian, grafik tegangan-regangan dan perubahan kekakuan balok BC2_g dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Hasil Analisa Pengujian Benda Uji BC2_g

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian frekuensi yang diperoleh dan hasil analisis kekakuan benda uji dapat ditarik beberapa kesimpulan yang sesuai dengan tujuan penelitian ini antara lain:

1. Perilaku dinamik benda uji balok T baik benda uji lentur maupun geser **sebelum** penambahan perkuatan *CFRPwrap* ditunjukkan dengan perubahan nilai frekuensi alami balok BFR₁, BFR₂, BC1_g dan BC2_g yang mengalami penurunan nilai frekuensi setelah mencapai kondisi retak awal berurutan sebesar 1.95%, 2.106%, 0.63% dan 8.38% akibat penambahan kerusakan pada benda uji setelah retak awal.

Perilaku dinamik benda uji balok T baik benda uji lentur maupun geser **setelah** penambahan perkuatan *CFRPwrap* ditunjukkan dengan perubahan nilai frekuensi alami balok BFR₁, BFR₂, BC1_g dan BC2_g yang mengalami peningkatan nilai frekuensi berurutan sebesar 41.29%, 42.86%, 10.34% dan 15% akibat adanya kekakuan tambahan dari perkuatan *CFRPwrap*

dan mengalami penurunan nilai frekuensi (akibat pembebanan berulang beban hidup dan beban statis lentur/geser hingga runtuh) masing-masing sebesar 20.36%, 14.1%, 15.27% dan 11.48% akibat penambahan kerusakan pada benda uji.

2. Hasil perbandingan perilaku dinamik Balok T beton bertulang diperkuat *CFRP* dan tanpa perkuatan yang diperoleh sebagai berikut:

a. Lentur

Pada benda uji lentur, balok kontrol BC₁ tanpa perkuatan mengalami perubahan frekuensi yaitu penurunan frekuensi dari kondisi awal ke kondisi runtuh sebesar 29.8%, sedangkan balok dengan perkuatan BFR₁ dan BFR₂ mengalami penurunan frekuensi dari kondisi awal ke kondisi runtuh berturut-turut sebesar 10.33% dan 20.13%. Penurunan nilai frekuensi balok T benda uji lentur dengan perkuatan lebih kecil

dari penurunan frekuensi balok T tanpa perkuatan.

- b. Geser
Pada benda uji geser, balok kontrol BC_g tanpa perkuatan mengalami perubahan frekuensi yaitu penurunan frekuensi dari kondisi awal ke kondisi runtuh sebesar 9.58%, sedangkan balok dengan perkuatan BC1_g dan BC2_g mengalami penurunan frekuensi dari kondisi awal ke kondisi runtuh berturut-turut sebesar 7.10% dan 6.74%. Penurunan nilai frekuensi balok T benda uji geser dengan perkuatan lebih kecil dari penurunan frekuensi balok T tanpa perkuatan.
3. Perubahan kekakuan benda uji balok lentur dan geser sebelum dan sesudah perkuatan *CFRPwrap* sebagai berikut:
 - a. Balok BFR₁ memiliki kekakuan awal sebesar 13214.29N/mm dan mengalami peningkatan nilai kekakuan setelah perkuatan menjadi 13489.58N/mm atau sebesar 2.08%.
 - b. Balok BFR₂ memiliki kekakuan awal sebesar 10746.89N/mm dan mengalami peningkatan nilai kekakuan setelah perkuatan menjadi 12950N/mm atau sebesar 20.50%.
 - c. Balok BC1_g memiliki kekakuan awal sebesar 32485.21N/mm dan mengalami peningkatan nilai kekakuan setelah perkuatan menjadi 53823.53N/mm atau sebesar 65.68%.
 - d. Balok BC2_g memiliki kekakuan awal sebesar 25250.97N/mm dan mengalami peningkatan nilai kekakuan setelah perkuatan menjadi 52320N/mm atau sebesar 107.2%.
4. Penambahan perkuatan *CFRP* pada balok T meningkatkan kekakuan balok tersebut yang digambarkan oleh peningkatan nilai frekuensi alami balok T baik pada perkuatan balok lentur maupun geser.
5. Penambahan perkuatan *CFRP* pada balok T tidak hanya menambah kapasitas lentur maupun geser tetapi juga mempengaruhi perilaku dinamik balok T tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D 78C-02. 2002. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*
- ACI 318M-02. 2002. *Building Code Requirements For Structural Concrete And Commentary (ACI 318RM-02)*
- ACI 440.2R.2017. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*
- ACI 440.2R-08.2008. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, Farmington Hills.*
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. Tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium (SNI 2493:2011). Jakarta: Dewan Standardisasi Nasional.
- Han, A.L., dkk.2018. Penelitian pemanfaatan *sheet* dan *rod.fiber* untuk perkuatan balok T: A Review, *Internasional Journal of Engineering*. MacGregor,
- Tudjono dkk. 2017. *Revitalization of Cracked Flexural Members using Retrofitting and Synthetic Wrapping*. *Procedia Engineering*, Volume 171, pp. 1123–1128.
- Wang, P., Chen, H., Zhou, Y., Wang, B., Jiang, M., ..Fan, H. (2018). *Failure mechanisms of CFRP-wrapped protective concrete arches under static and blast loading : Experimental research*. *Composite Structures*.
- Anonim, 2013, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, Bandung. (SNI 2847-2013).
- Biggs, J.M., 1964, *Structural Dynamics, McCraw-Hill Book company, USA.*
- Cluough, R.W., and Penzien, J., 1982, *Dynamic of Structures*, McCraw-Hill, Kogakusha.
- Priyosulistyo., Bahan Kuliah, Program Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Mehdizadeh, M., 2009. *Curvature Mode Shape Analyses of Damage in Structures*, Thesis, RMIT University.
- Nawy, E.G., 1990, *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Mendasar* (diterjemahkan oleh Bambang Suryoatmono), Eresco, Bandung.
- Paz, M., 1996. *Dinamika Struktur, Teori dan Perhitungan*. (diterjemahkan oleh Ir. Manu A.P.), Erlangga, Jakarta.
- Saleh, F., 2000, *Deteksi Lokasi Kerusakan Balok Beton Non-Prismatis dengan Perubahan Mode Kelengkungan*, Tesis, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suhendro B., 1995, *Struktur Dinamik*, Bahan Kuliah, Program Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Supriyadi, B., 2008. *Pengaruh Beban Sejumlah Orang Bernyanyi dan Berjoget Bersama pada Struktur Lantai Gedung Berbentang Panjang* (Studi Kasus Gedung Grha Sabha Pramana UGM), *journal Media Teknik Sipil*, Yogyakarta.
- Widorini, T., 2012. *Karakteristik Dinamik Pelat Lantai semi Precast dengan perkuatan shear connector*, Tesis, Program Pasca Sarjana,

- Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Arjanto., 2002. Perilaku Dinamik Balok Beton Bertulang retrofit dengan CFRP Wrap, Tesis, Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta
- Tuhuteru, E., 2013. Pengaruh shear connector terhadap Perilaku Dinamik Pelat Semi Pracetak, Tesis, Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta
- Paulinus, C., 2015. Perilaku Lentur Pelat Lantai Semi Precast Menggunakan Shear Connector akibat Beban Dinamik, Tesis, Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.