

## PEMBUATAN ALAT BANTU DESAIN PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN FRP BERDASARKAN ACI 440.2R-17

Reynold Judithia<sup>1</sup>, Gilbert Alexander<sup>2</sup>, Pamuda Pudjisuryadi<sup>3</sup> dan Gunawan Budi Wijaya<sup>4</sup>

**ABSTRAK:** Ada berbagai cara untuk memperkuat struktur bangunan beton bertulang. Memperbesar dimensi, memperpendek bentang, hingga menggunakan FRP adalah beberapa metode untuk memperkuat kapasitas elemen struktur. Seiring berkembangnya teknologi, nilai ekonomis FRP menjadi semakin tinggi. Hal inilah memacu permintaan terhadap alat bantu untuk merencanakan FRP. Sayangnya, alat bantu perhitungan perkuatan dengan FRP mayoritas dibuat oleh para produsen FRP, sehingga penggunaannya dibatasi pemakaiannya hanya untuk produk tertentu. Oleh karena itu, dibuat sebuah alat bantu FRP yang umum, mudah untuk digunakan, serta memiliki hasil *output* yang cukup lengkap seperti regangan, tegangan, gaya dalam masing – masing penampang baik dalam kondisi batas ultimit maupun kondisi batas kemampuan layan, sebelum dan sesudah diperkuat hingga notifikasi – notifikasi yang sekiranya membantu para pengguna program untuk mengoptimalkan perhitungan perkuatan lentur pada balok beton bertulang dengan menggunakan FRP. Program telah terverifikasi terhadap berbagai kemungkinan kasus sehingga terbukti mempunyai perhitungan yang sesuai dengan ACI 440.2R-17. Program yang dibuat dengan basis Visual Basic 2015 .Net cocok untuk digunakan sebagai sarana edukasi maupun untuk kepentingan profesional karena ramah kepada pengguna program.

**KATA KUNCI:** ACI 440.2R-17, balok beton bertulang, FRP, kapasitas lentur, kondisi batas kemampuan layan, kondisi batas ultimit, perkuatan, visual basic 2015 .Net

### 1. PENDAHULUAN

Terkadang, bangunan yang sudah berdiri memerlukan perkuatan tambahan karena alasan tertentu untuk memenuhi kapasitas yang diperlukan. Contohnya adalah perkuatan dengan pembesaran dimensi, memperpendek bentang hingga menggunakan material FRP (*fiber reinforced polymer*). Desain perkuatan menggunakan FRP diatur dalam beberapa peraturan, salah satunya adalah ACI 440.2R-17. Peraturan ini mengatur berbagai hal, seperti batasan perkuatan, cara menghitung kontribusi perkuatan FRP terhadap kapasitas lentur balok, dan syarat – syarat yang ada pada kondisi batas ultimit (*ultimate limit states / ULS*) dan kondisi batas kemampuan layan (*serviceability limit states / SLS*). Alat bantu desain perkuatan lentur balok beton bertulang dengan FRP ini mampu melakukan pengecekan terhadap syarat – syarat yang ada sehingga desain perkuatan bisa lebih optimal dan detail tanpa mengesampingkan keamanan yang telah dirumuskan oleh ACI. Oleh karena itu, program perhitungan perkuatan dengan FRP ini sesuai dengan kebutuhan baik dalam bidang pendidikan maupun dalam ranah profesional.

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, ReynoldJudithia@gmail.com.

<sup>2</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, Gilbertalexander@hotmail.com.

<sup>3</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, Pamuda@petra.ac.id.

<sup>4</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, Gunawanbw@petra.ac.id.

## 2. MATERIAL FRP

Ada berbagai macam FRP yang dapat dikelompokkan berdasarkan bentuk dan material. Berdasarkan bentuknya FRP dibagi menjadi 2: yaitu dalam bentuk *laminates / wrap*, biasanya menempel di permukaan beton dan bentuk *rod* batangan FRP yang dipasangkan dengan cara menanam ke dalam permukaan beton membuat FRP menjadi lebih terlindung. Pembagian FRP berdasarkan material antara lain: GFRP (bahan kaca/*glass*), AFRP (bahan *aramid*), dan CFRP (bahan karbon/*carbon*). Pembagian – pembagian ini mendasari faktor reduksi yang akan mempengaruhi perhitungan kapasitas FRP seperti yang terlampir pada **Tabel 1**.

**Tabel 1. Faktor Reduksi FRP pada Beberapa Jenis Lingkungan (Sumber: ACI 440.2R-17 Table 9.4)**

Kondisi	Tipe	Faktor reduksi $C_E$
Interior	<i>Carbon</i>	0.95
	<i>Glass</i>	0.75
	<i>Aramid</i>	0.85
Eksterior (pada jembatan, piers, dan lahan parkir yang tidak tertutup)	<i>Carbon</i>	0.85
	<i>Glass</i>	0.65
	<i>Aramid</i>	0.75
Lingkungan yang agresif (pabrik kimia dan pabrik pengolahan air kotor)	<i>Carbon</i>	0.85
	<i>Glass</i>	0.50
	<i>Aramid</i>	0.70

## 3. REKOMENDASI DESAIN BERDASARKAN ACI 440.2R-17

FRP dapat menahan beban lentur. Untuk perkuatan terhadap beban lentur, FRP bekerja menyerupai tulangan baja pada umumnya, di mana FRP akan bekerja dengan membantu menopang tegangan tarik. ACI 440.2R-17 menggunakan prinsip *limit states – design* yang mengacu kepada pembebanan pada ACI 318-14 termasuk dengan syarat – syarat kondisi batas ultimit dan kondisi batas kemampuan layan.

Berdasarkan ACI 440.2R-17 ada beberapa persyaratan agar perkuatan lentur layak dilakukan. Hal ini didasari oleh tujuan untuk menghindari terjadi kegagalan pada struktur dalam kondisi FRP tidak berfungsi, misalkan akibat kecelakaan, atau perbuatan vandalisme, struktur masih mampu bertahan tanpa terjadi keruntuhan. Adapun syarat - syarat tersebut adalah sbb:

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{new} \quad \text{(Pers. 3.1)}$$

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1.1S_{DL} + 1.0S_{LL})_{new} \quad \text{(Pers. 3.2)}$$

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1.0S_{DL} + 1.0S_{LL})_{new} \quad \text{(Pers. 3.3)}$$

$$f_c' > 17 \text{ MPa} \quad \text{(Pers. 3.4)}$$

dimana,

$(\phi R_n)_{existing}$  = kapasitas nominal struktur sebelum diperkuat

$S_{DL}$  = gaya dalam akibat beban mati (*dead load*) yang direncanakan

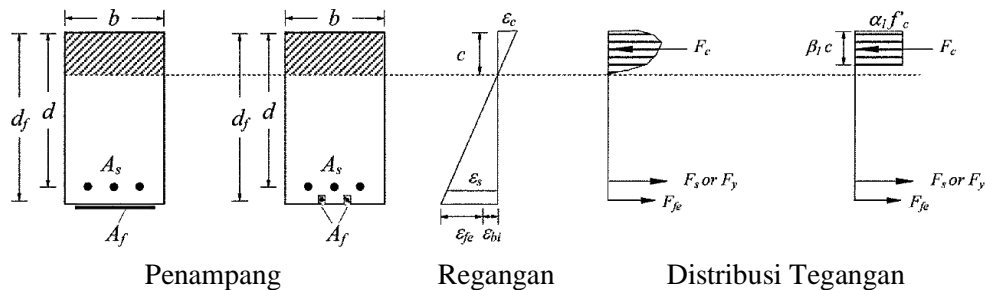
$S_{LL}$  = gaya dalam akibat beban hidup (*live load*) yang direncanakan

Persyaratan pada Pers. 3.1 diperuntukkan bangunan yang tidak mengalami kebakaran dan memiliki beban hidup yang relatif kecil. Pada Pers. 3.2, persyaratan diperuntukkan pada bangunan yang mengalami kebakaran namun memiliki beban hidup yang cukup besar, diatas 730 kg/m<sup>2</sup>, untuk jangka waktu yang panjang. Persyaratan pada Pers. 3.3 digunakan untuk memastikan struktur yang diperkuat tidak runtuh ketika mengalami kebakaran. Sesuai Pers. 3.4 untuk perkuatan dengan FRP, mutu beton *existing* harus ada pada mutu minimum yang diijinkan yaitu 17 MPa.

Jika pada saat pemasangan perkuatan FRP, terdapat regangan awal yang sudah terjadi pada penampang balok beton baik karena beban mati maupun beban hidup, maka regangan ini perlu diperhatikan. Regangan awal ini disebut juga sebagai *initial strain* ( $\epsilon_{bi}$ ). Nilai  $\epsilon_{bi}$  dapat ditentukan dengan analisa elastis pada komponen struktur yang ada, dengan beban yang bekerja pada struktur selama pelaksanaan pemasangan FRP, baik beban sendiri struktur, beban layan, atau jika digunakan metode jacking sehingga  $\epsilon_{bi}$  menjadi sama dengan 0. Analisa elastis dari struktur yang ada harus didasarkan pada *cracked section properties*.

#### 4. PERHITUNGAN KONDISI BATAS ULTIMIT

**Gambar 1** mengilustrasikan regangan dan distribusi tegangan penampang persegi pada kondisi batas ultimit.



**Gambar 1. Diagram Tegangan-Regangan Balok Bertulang yang Diperkuat FRP pada Kondisi Batas Ultimit (Sumber: ACI 440.2R-17 Fig. 10.2.10)**

Perhitungan kondisi batas ultimit digunakan untuk mengetahui kapasitas maksimal atau kapasitas runtuh struktur balok yang mengacu pada peraturan ACI 318-14. Ada beberapa asumsi yang perlu dipakai dalam perhitungan kondisi batas, antara lain:

- Regangan (*strain*) pada tulangan dan beton berbanding lurus dari garis netral. Sehingga, penampang sebelum pembebanan serupa dengan penampang setelah pembebanan (*Plane Section Remains Plane*)
- Tidak ada slip antara perkuatan FRP dengan beton
- Deformasi geser pada *adhesive* layer diabaikan karena sangat tipis
- Regangan tekan pada beton ( $\epsilon_c$ ) maksimum 0.003
- Kuat tarik pada beton diabaikan
- Perkuatan FRP memiliki hubungan *linear* antara *elastic stress-strain* sampai mengalami kegagalan.

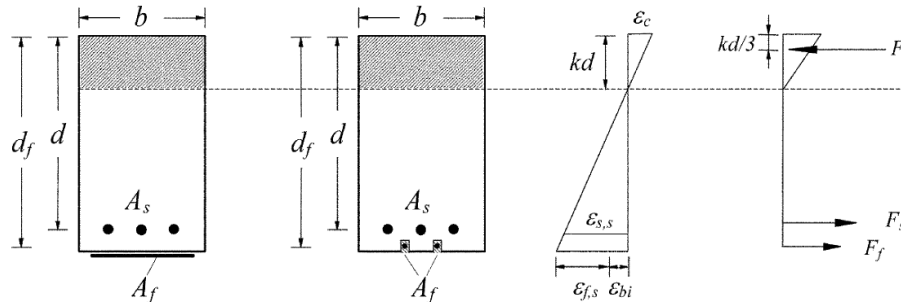
Kapasitas runtuh dari sebuah balok beton bertulang yang diberi perkuatan dengan FRP dapat dicapai berdasarkan kegagalan dari:

- Daya laminasi dari FRP atau regangan maksimal yang dapat ditahan oleh hubungan antara FRP dengan permukaan beton. Batasan ini ada baik untuk FRP jenis *wrap* maupun FRP jenis *laminate*.
- Kapasitas maksimal FRP atau regangan maksimal FRP yang tertera atau hasil klaim dari pabrik yang memproduksi FRP tersebut.
- Kapasitas maksimal beton bertulang atau regangan tekan maksimum dari beton, berdasarkan ACI 318-14 regangan maksimal dari beton diambil sebesar 0.003.

Ketiga batasan ini diambil nilai terkecil, di mana berarti batasan inilah yang dijadikan sebagai acuan kapasitas maksimal dari balok beton bertulang yang telah diperkuat.

## 5. PERHITUNGAN KONDISI BATAS KEMAMPUAN LAYAN

**Gambar 2** mengilustrasikan regangan dan distribusi tegangan penampang persegi pada kondisi batas kemampuan layan.



**Gambar 2. Diagram Tegangan-Regangan Balok Bertulang yang Diperkuat FRP pada Kondisi Batas Kemampuan Layan (Sumber : ACI 440.2R-17 Fig. 10.2.10.1)**

Perhitungan kondisi batas kemampuan layan digunakan untuk mencegah kerusakan *creep rupture* dan *fatigue stress limit*. Alat bantu perhitungan ini menggunakan metode dasar teori *transformed section* untuk perhitungan momen inersia dari penampang komposit balok beton bertulang. Metode teori dilakukan dengan cara seluruh komponen ditransformasikan ke beton dengan nilai tertentu, sehingga seolah – olah penampang tersebut menjadi lebih besar atau lebih kecil.

Menurut ACI 318-14, kondisi batas kemampuan layan mempunyai beberapa syarat yang harus dipenuhi antara lain:

$$\begin{aligned} \text{Tegangan tulangan baja} &\leq 0.80 f_y && (\text{ACI 440.2R-17 eq. 10.2.8a}) \\ \text{Tegangan tekan beton} &\leq 0.60 f_c' && (\text{ACI 440.2R-17 eq. 10.2.8b}) \\ \text{Tegangan FRP} &\leq \text{sustained plus cyclic stress limit} && (\text{ACI 440.2R-17 eq. 10.2.9}) \end{aligned}$$

Beberapa bahan FRP mempunyai respon yang berbeda – beda terhadap beban jangka panjang. Nilai *sustained plus cyclic stress limit* masing-masing bahan FRP dapat dilihat di **Tabel 2**.

**Tabel 2. Tabel Batas Tegangan Berjangka dan Berkala (Sumber: ACI 440.2R-17 Table 10.2.9)**

	Tipe FRP		
	GFRP	AFRP	CFRP
<b>Batas Tegangan berjangka dan berkala / <i>sustained plus cyclic stress limit</i></b>	<b>0.20<math>f_{tu}</math></b>	<b>0.30<math>f_{tu}</math></b>	<b>0.55<math>f_{tu}</math></b>

Dalam kondisi batas kemampuan layan, beton bertulang yang diperkuat FRP harus memenuhi kesetimbangan gaya hukum newton. Gaya dalam masing-masing komponen harus saling meniadakan atau melakukan aksi - reaksi ( $\Sigma H = 0$ ).

## 6. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian diawali dengan mempelajari referensi – referensi mengenai FRP dan program Visual Basic 2015.Net. Referensi FRP utamanya diambil dari ACI 440.2R-17, di mana ini adalah peraturan terbaru dari Amerika mengenai FRP. Verifikasi pada program dilakukan dengan beberapa metode yakni

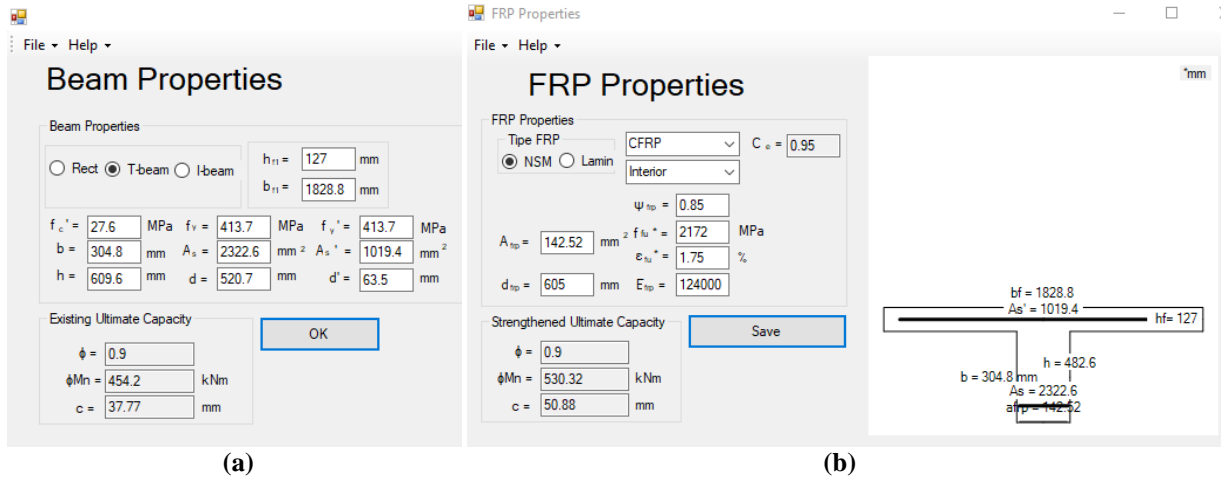
membandingkan contoh perhitungan yang ada dalam ACI 440.2R-17 *ch.* 16.3 dan pembuatan studi kasus beserta contoh perhitungannya.

## 7. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian ini adalah alat bantu desain perkuatan lentur balok beton bertulang yang mudah digunakan oleh *user*. Alat bantu mempunyai informasi desain yang rinci sehingga dapat digunakan baik untuk edukasi maupun untuk para profesional. Program memiliki fitur berupa kemampuan *input* data properti material balok bertulang yang hendak diperkuat, material FRP, beban struktur yang terdiri dari beban mati dan beban hidup, serta menentukan beban pada struktur selama pelaksanaan. Fitur *output* dari program berupa nilai kapasitas lentur balok dan diagram regangan-tegangan-gaya dalam beserta nilai nya pada kondisi batas ultimit dan kondisi batas kemampuan layan baik sebelum diperkuat dan setelah diperkuat. Program memberikan pemberitahuan bila balok bertulang perlu atau tidak perlu untuk diperkuat, boleh tidaknya untuk diperkuat dengan FRP, dan bila balok yang sudah diperkuat sudah atau belum memenuhi beban yang direncanakan. Program juga mampu untuk menghasilkan laporan berupa ringkasan dari desain perkuatan yang telah dilakukan. Dengan tampilan yang cukup mudah digunakan serta *output* yang lengkap dan mendetail merupakan kelebihan dari program ini, terlebih lagi dengan dukungan program Visual Basic 2015 .Net yang mudah digunakan dan dirubah untuk disesuaikan di masa yang akan datang.

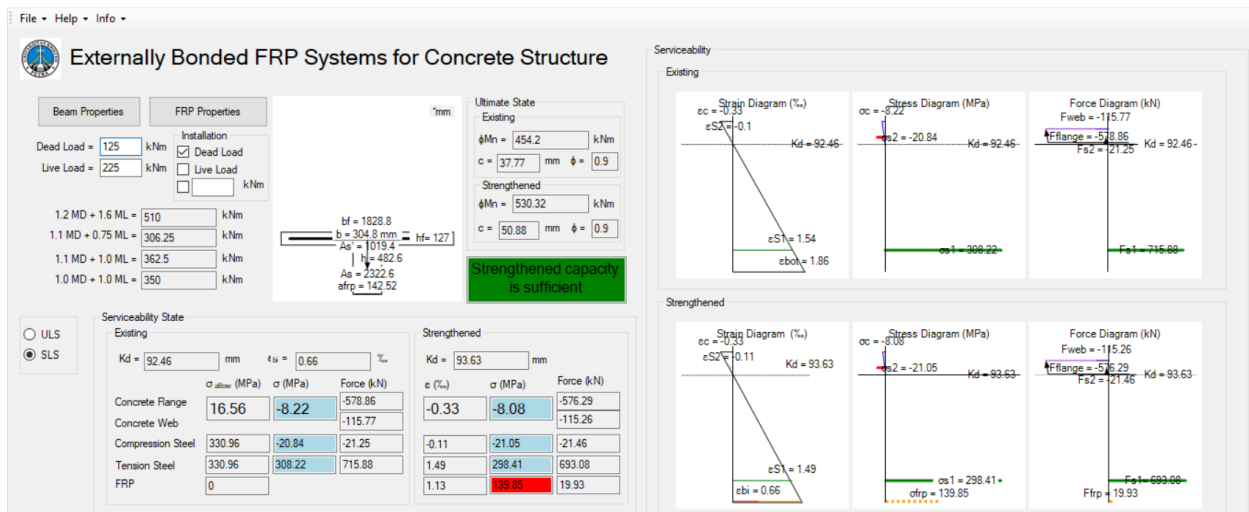
Alat bantu perhitungan ini memiliki 3 tampilan utama yang dibagi berdasarkan jenis *input* data. Tampilan utama adalah *form* untuk memasukkan data beban yang ingin diterima, sedangkan untuk *form* kedua dan ketiga ditujukan untuk memasukkan data penampang balok beton bertulang dan data FRP yang ingin digunakan. Sedangkan, keseluruhan *output* ditampilkan dalam *form* menu utama. *Output* tersebut berupa regangan, tegangan, dan gaya baik sebelum maupun setelah diperkuat, baik dalam kondisi batas ultimit batas maupun kondisi batas kemampuan layan, dan juga grafik – grafik yang menunjang pemahaman *user*, sehingga dalam perhitungannya dapat dibandingkan dengan perhitungan manual.

Pada *form* balok (**Gambar 3a**), *user* memasukkan data geometris balok bertulang dan mutu tulangan baja dan beton. Sedangkan pada *Form* FRP (**Gambar 3b**), *user* diminta untuk memasukkan data mengenai FRP yang ingin digunakan yakni lebar, tebal, dan banyak *layer* FRP untuk tipe *wrap* atau *laminates*, atau luasan nominal penampang FRP untuk tipe NSM, regangan maksimal, modulus elastisitas, jenis bahan FRP, dan letak eksposur FRP. Pada *form* utama (**Gambar 4**), *user* memasukkan *input* beban yakni beban saat pemasangan, beban hidup, dan beban mati. *Output* yang ditunjukkan dalam *form* utama adalah kapasitas lentur penampang dan data regangan-tegangan-gaya dalam penampang kondisi batas ultimit dan kondisi batas kemampuan layan dalam bentuk data numerik dan bentuk diagram grafis.



Gambar 3. Tampilan *Form Input* Properti Balok Beton Bertulang:

Alat bantu perhitungan ini ditujukan dalam bidang edukasi dan ranah profesional, sehingga *output* dari program ini dapat sesuai dengan kebutuhan yang ada. Seperti pada **Gambar 4**, *output* berupa informasi kapasitas lentur balok sebelum dan sesudah diperkuat ( $\phi M_{n,existing}$  dan  $\phi M_{n,strengthened}$ ), diagram regangan, tegangan, dan gaya dalam pada masing-masing komponen pada analisa *Serviceability Limit States (SLS)* dan analisa *Ultimate Limit States (ULS)* baik sebelum dan sesudah diperkuat. Fitur *output* program dapat dibentuk laporan dengan *format* file “Microsoft Word” (.docx) yang mencakup detail data *input* dan hasil *output*.



Gambar 4. Tampilan *Form* Utama Setelah Melakukan Perhitungan

Telah dilakukan studi kasus berupa verifikasi dengan berbagai macam kondisi balok, baik balok dengan tulangan tunggal dan tulangan ganda, dan balok yang memiliki sayap maupun berbentuk persegi. Untuk kondisi balok bersayap, telah dilakukan verifikasi dengan balok yang memiliki garis netral diatas maupun dibawah tebal sayap. Studi kasus dirangkum dalam **Tabel 3 – Tabel 5**.

Tabel 3. Rangkuman Properti Material Beton Bertulang pada Studi Kasus

Balok	Badan Beton			Sayap Tekan Beton		Tulangan Utama			Tulangan Tekan		
	$f_c'$ (MPa)	b (mm)	h (mm)	$b_{fl}$ (mm)	$h_{fl}$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	d (mm)	$f_y'$ (MPa)	$A_s'$ (mm <sup>2</sup> )	d' (mm)
ACI	34.5	304.8	609.6	---	---	413.7	1935.5	546.1	---	---	---
4.3.1	34.5	150	260	---	---	400	226	225	400	226	25
4.3.2	27.6	304.8	609.6	1828.8	127	413.7	2322.6	520.7	---	---	---
4.3.3	20	300	700	450	100	420	1963.5	652	---	---	---
4.3.4	20	304.8	609.6	1828.8	127	413.7	2322.6	520.7	413.7	1019.4	63.5
4.3.5	27.6	304.8	609.6	1828.8	127	413.7	2322.6	520.7	413.7	1019.4	63.5
4.3.6	20	200	700	450	100	420	2322.6	652	420	265.5	48

Tabel 4. Rangkuman Beban, Nilai *Initial Strain* ( $\epsilon_{bi}$ ) Program, dan Properti Material FRP pada Studi Kasus

Balok	Beban Mati (kNm)	Beban Hidup (kNm)	Beban saat Pelaksanaan (kNm)	$\epsilon_{bi}$ (%)	$b_{FRP}$ (mm)	$t_{FRP}$ (mm)	n	$d_{FRP}$ (mm)	$E_{FRP}$ (MPa)	$f_{fu}^*$ (MPa)	$\epsilon_{fu}^*$ (%)
					$A_{FRP}$ (mm <sup>2</sup> )						
ACI	97.62	176.26	97.62	0.061	304.8	1.02	2	609.6	37	621	1.5
4.3.1	4	10	4	0.052	50	1.2	1	260	165	2900	1.80
4.3.2	125	225	125	0.066	300	1.2	1	609.6	165	2900	1.80
4.3.3	45	245	45	0.021	160	1.2	1	700	165	2900	1.80
4.3.4	60	220	60	0.034	95.01			605	124	2241	1.81
4.3.5	125	225	125	0.066	71.26			605	124	2172	1.75
4.3.6	60	240	60	0.028	95.01			695	124	2241	1.81

Tabel 5. Rangkuman Hasil Perhitungan Program pada Studi Kasus

Balok	Kondisi Batas Ultimit ( <i>Ultimate Limit States</i> )					Kondisi Batas Kemampuan Layan ( <i>Serviceability Limit States</i> )				
	c (mm)	$\phi M_n$ (kNm)	Keterangan			kd (mm)	$f_{c,s}$ (MPa)	$f_{s',s}$ (MPa)	$f_{s,s}$ (MPa)	$f_{r,s}$ (MPa)
			Tulangan	Bentuk Balok	Letak garis netral (c)					
ACI	131.78	444.78	Tunggal	Persegi	-----	185.98	-19.85	---	278.48	38.01
4.3.1	46.55	26.85	Ganda	Persegi	$c > d'$	59.20	-12.40	-51.92	251.65	165.64
4.3.2	72.62	537.45	Tunggal	Balok-T	$c < h_{fl}$	97.57	-7.91	---	277.93	167.86
4.3.3	180.50	452.05	Tunggal	Balok-T	$c > h_{fl}$	208.55	-11.47	---	232.02	176.72
4.3.4	101.46	471.88	Ganda	Balok-T	$c > d'$	157.55	-11.41	-64.80	250.19	149.04
4.3.5	50.88	530.32	Ganda	Balok-T	$c < d'$	93.63	-8.08	-21.05	298.41	139.85
4.3.6	139.14	511.72	Ganda	Balok-T	$c > h_{fl}$	200.32	-11.70	-84.68	251.11	135.49

## 8. KESIMPULAN

Program ini mempunyai ruang lingkup mulai dari perhitungan kapasitas lentur balok beton bertulang dengan atau tanpa perkuatan FRP, baik dalam kondisi batas ultimit maupun kondisi batas kemampuan layan. Fitur *output* Hasil perhitungan yang dihasilkan berupa hasil perhitungan, tampilan grafik, dan laporan dalam format *Microsoft Word*. Program juga mengeluarkan notifikasi apakah perkuatan dengan FRP boleh dilakukan sesuai dengan syarat – syarat yang berlaku.

Ada beberapa saran dalam mengembangkan program ini, antara lain adalah dalam hal grafik yang masih sederhana, sehingga informasi yang diberikan kurang memadai atau kurang lengkap. Selain itu, ruang lingkup dari program ini cukup spesifik, sehingga bisa dikembangkan ke arah yang lebih luas. Seperti perkuatan FRP terhadap beban geser balok beton bertulang, perkuatan pada balok beton bertulang yang mengalami *post-tensioning*, perkuatan kolom beton bertulang, dsb.

## 9. DAFTAR REFERENSI

- ACI Committee 318-14. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI, U.S.A.
- ACI Committee 440.2R (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-17*. Farmington Hills, MI , U.S.A.