

## **ALAT BANTU DESAIN PERKUATAN GESER BETON BERTULANG DENGAN *FIBER-REINFORCED POLYMER (FRP)* BERDASARKAN ACI 440.2R-17**

Mira Novita<sup>1</sup>, Stela<sup>2</sup>, Pamuda Pudjisuryadi<sup>3</sup>, dan Gunawan Budi Wijaya<sup>4</sup>

**ABSTRAK:** Perkuatan struktur beton bertulang terhadap geser dapat mencegah kegagalan geser yang bersifat getas, sehingga ketahanan struktur terhadap gempa juga meningkat. Salah satu metode perkuatan struktur yang saat ini sedang berkembang adalah sistem *fiber-reinforced polymer* (FRP). Alat bantu perencanaan FRP yang tersedia saat ini dibuat oleh produsen FRP, sehingga penggunaannya dibatasi hanya untuk produk tertentu. Oleh karena itu, dibuat sebuah program yang lebih fleksibel dan mudah digunakan. Dalam program ini, *user* dapat mendesain FRP sebagai perkuatan geser struktur dalam upaya rehabilitasi seismik. Program dapat memberikan *output* yaitu kekuatan geser sebelum perkuatan, kekuatan geser setelah perkuatan, serta notifikasi yang cukup lengkap dan informatif sehingga *user* dapat melakukan perhitungan perkuatan geser menggunakan FRP secara optimal. Program telah diverifikasi dengan beberapa kasus sehingga terbukti mempunyai perhitungan yang sesuai dengan standar perencanaan FRP terbaru, yaitu ACI 440.2R-17. Program yang dibuat dengan basis Visual Basic 2017 ini memiliki tampilan sederhana sehingga cocok untuk digunakan sebagai sarana edukasi maupun untuk kepentingan profesional.

**KATA KUNCI:** *fiber-reinforced polymer*, geser, ACI 440.2R-17, program, Visual Basic 2017

### **1. PENDAHULUAN**

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas gempa bumi yang tinggi. Namun, banyak bangunan di Indonesia yang belum direncanakan terhadap beban gempa, sehingga berpotensi mengalami kegagalan geser yang bersifat getas. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya rehabilitasi seismik terhadap bangunan *existing* untuk meningkatkan performa seismik bangunan. Salah satu metode rehabilitasi seismik yang saat ini sedang berkembang adalah sistem *fiber-reinforced polymer* (FRP). Dibandingkan dengan material beton dan baja, material FRP memiliki kelebihan sebagai berikut: ringan, tidak korosif, kuat terhadap gaya tarik, tahan lama, dapat didaur ulang, dan mudah dalam perawatan. Walaupun memiliki banyak keunggulan, sistem FRP masih belum banyak diaplikasikan di Indonesia. Salah satu penyebab FRP belum umum digunakan di Indonesia adalah belum tersedianya Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berisi tentang peraturan desain FRP. Dengan demikian, desain perkuatan dengan FRP harus dilakukan berdasarkan standar asing, salah satunya adalah ACI 440.2R-17.

Program perencanaan FRP yang tersedia secara bebas dikembangkan oleh produsen FRP, sehingga penggunaan program menjadi terbatas pada FRP merek tertentu. Selain itu, program perencanaan FRP yang tersedia secara bebas belum memiliki fitur perencanaan FRP sebagai perkuatan seismik. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dibuat alat bantu desain perkuatan beton bertulang dengan FRP, khususnya untuk meningkatkan kapasitas geser akibat beban gravitasi maupun beban seismik. Alat bantu yang dibuat adalah berupa program dengan basis Visual Basic.

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, m21415134@john.petra.ac.id.

<sup>2</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, m21415140@john.petra.ac.id.

<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. REKOMENDASI DESAIN BERDASARKAN ACI 440.2R-17

Struktur yang sudah ada harus memenuhi beberapa batasan, sebagai berikut:

$$f'_c \geq 17 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 0,75S_{LL})_{new} \quad (2)$$

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 1,0S_{LL})_{new} \quad (3)$$

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1,0S_{DL} + 1,0S_{LL})_{new} \quad (4)$$

di mana:

$f'_c$  = kuat tekan beton, MPa

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

$S_{DL}$  = gaya dalam akibat beban mati yang direncanakan

$S_{LL}$  = gaya dalam akibat beban hidup yang direncanakan

Persamaan (3) dihitung ketika beban hidup yang direncanakan merupakan beban yang ada untuk periode yang cukup lama atau ketika beban hidup melebihi 730 kg/m<sup>2</sup>, sedangkan Persamaan (4) dihitung ketika bangunan didesain terhadap kebakaran.

Elemen aksial yang hendak diperkuat dengan FRP *confinement* harus memenuhi persyaratan berikut:

$$h/b \leq 2 \text{ untuk kekuatan terhadap beban gravitasi} \quad (5)$$

$$h/b \leq 1,5 \text{ untuk kekuatan seismik} \quad (6)$$

$$b \text{ atau } h \leq 900 \text{ mm} \quad (7)$$

di mana:

$h$  = dimensi sisi panjang penampang kolom, mm

$b$  = dimensi sisi pendek penampang kolom, mm

Penampang beton segi empat yang tidak memenuhi syarat pada Persamaan (5)-(7) tidak direkomendasikan untuk diperkuat dengan FRP *confinement*. Perkuatan FRP *confinement* pada penampang lingkaran tidak perlu diperiksa terhadap Persamaan (5)-(7).

## 3. KOMBINASI BEBAN

Kuat rencana penampang struktur beton harus direncanakan sama atau lebih besar dari beban terfaktor ( $Q_U$ ) yang dihitung menggunakan Persamaan (8)-(13). Kombinasi  $Q_U$  untuk perkuatan struktur terhadap beban gravitasi didasarkan pada ACI 318-14, sedangkan kombinasi  $Q_U$  untuk perkuatan struktur terhadap kombinasi beban seismik didasarkan pada ASCE/SEI 41-13.

$$Q_U = 1,4D \quad (8)$$

$$Q_U = 1,2D + 1,6L \quad (9)$$

$$Q_U = 1,1D + 0,275L + \left( \frac{\pm 1E_X \pm 0,3E_Y}{C_1 C_2 J} \right) \quad (10)$$

$$Q_U = 1,1D + 0,275L + \left( \frac{\pm 0,3E_X \pm 1E_Y}{C_1 C_2 J} \right) \quad (11)$$

$$Q_U = 0,9D + \left( \frac{\pm 1E_X \pm 0,3E_Y}{C_1 C_2 J} \right) \quad (12)$$

$$Q_U = 0,9D + \left( \frac{\pm 0,3E_X \pm 1E_Y}{C_1 C_2 J} \right) \quad (13)$$

di mana:

$D$  = gaya dalam akibat beban mati

$L$  = gaya dalam akibat beban hidup

$E_X$  = gaya dalam akibat gempa arah X-global berdasarkan analisis elastis

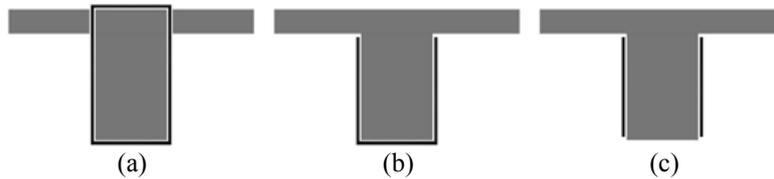
$E_Y$  = gaya dalam akibat gempa arah Y-global berdasarkan analisis elastis

$C_1 C_2$  = faktor modifikasi berdasarkan ASCE/SEI 41-13 Subbab 7.4.1.3

$J$  = faktor modifikasi berdasarkan ASCE/SEI 41-13 Subbab 7.5.2.1.2

#### 4. POLA PEMASANGAN LEMBAR FRP

Dapat dilihat dalam **Gambar 1**, terdapat tiga pola pemasangan FRP yang dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas geser, yaitu *wrap* menyeluruh, tiga sisi (*U-wrap*), dan dua sisi. Pada elemen struktur dengan penampang lingkaran, lembaran FRP harus dipasang secara menyeluruh pada keliling penampang dengan orientasi melintang terhadap sumbu longitudinal elemen struktur (90°).



**Gambar 1. Pola Pemasangan FRP: (a) Wrap Menyeluruh, (b) Tiga Sisi (U-wrap), dan (c) Dua Sisi**

#### 5. SYARAT PERKUATAN GESER TERHADAP BEBAN GRAVITASI

Perkuatan geser dengan FRP dikatakan sudah mencukupi apabila kuat geser rencana elemen lebih besar atau sama dengan geser terfaktor yang dihitung melalui kombinasi pembebanan metode ultimit, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (14). Rumusan kuat geser rencana dituliskan dalam Persamaan (15).

$$\phi V_n \geq V_u \quad (14)$$

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (15)$$

di mana:

$\phi V_n$  = kuat geser rencana, N

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan = 0,75 untuk perkuatan terhadap beban gravitasi

$V_n$  = kuat geser nominal, N

$V_u$  = gaya geser terfaktor yang dihitung menggunakan Persamaan (8) – (9), N

$V_c$  = kuat geser nominal beton, N

$V_s$  = kuat geser nominal baja, N

$\psi_f$  = faktor reduksi kekuatan FRP berdasarkan pola pemasangan

= 0,95 untuk pola pemasangan *wrap* menyeluruh pada keliling penampang

= 0,85 untuk pola pemasangan *wrap* tiga sisi (*U-wrap*) dan dua sisi

$V_f$  = kuat geser nominal FRP, N

Penjumlahan kekuatan geser nominal baja dan FRP tidak boleh melebihi batas pada Persamaan (16):

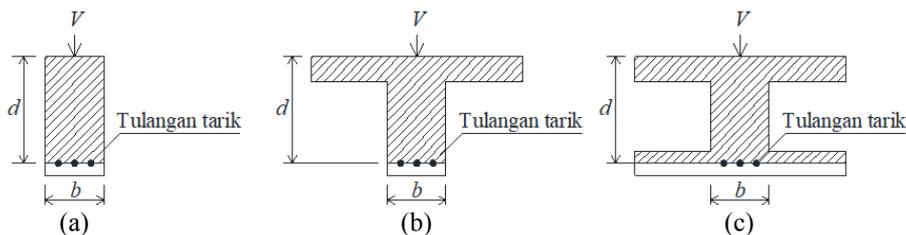
$$V_s + V_f \leq 0,66\sqrt{f'_c}bd \quad (16)$$

di mana:

$b$  = dimensi penampang dalam arah tegak lurus gaya geser, mm

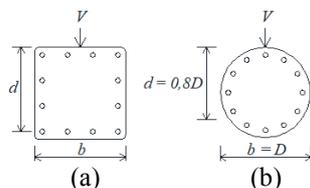
$d$  = jarak dari serat tekan terluar ke titik pusat tulangan tarik baja diukur dalam arah sejajar gaya geser, mm

$bd$  merupakan luasan geser, yaitu luasan beton di atas tulangan tarik.  $bd$  untuk balok penampang segi empat, T, dan I ditunjukkan pada **Gambar 2**.



**Gambar 2. Keterangan bd untuk Penampang Balok: (a) Segi Empat, (b) T, dan (c) I**

$bd$  untuk kolom ditunjukkan pada **Gambar 3**. Untuk kolom dengan penampang lingkaran,  $bd$  diambil sebesar  $0,8D^2$  dengan  $D$  adalah diameter kolom.



**Gambar 3. Keterangan  $bd$  untuk Penampang Kolom: (a) Segi Empat, dan (b) Lingkaran**

## 6. SYARAT PERKUATAN GESER TERHADAP KOMBINASI BEBAN SEISMIK

Perkuatan geser dengan FRP dikatakan sudah mencukupi apabila kuat geser rencana elemen lebih besar atau sama dengan gaya geser desain, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (17). Rumusan kuat geser rencana dituliskan dalam Persamaan (18) dan Persamaan (19). Penjumlahan kekuatan geser nominal baja dan FRP tidak boleh melebihi batas pada Persamaan (16).

$$\phi V_n \geq \max(V_u, V_e) \quad (17)$$

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \text{ untuk balok} \quad (18)$$

$$\phi V_n = \phi(kV_c + kV_s + \psi_f V_f) \text{ untuk kolom} \quad (19)$$

di mana:

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan = 0,75 untuk perkuatan terhadap kombinasi beban gravitasi

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan = 1 untuk perkuatan terhadap kombinasi beban gravitasi dan gempa

$V_u$  = gaya geser terfaktor yang dihitung menggunakan Persamaan (8) – (13), N

$V_u$  pada sendi plastis balok atau kolom dengan kebutuhan daktilitas menengah atau tinggi dihitung berdasarkan ACI 318-11 Bab 21.  $V_u$  pada sendi plastis balok dengan kebutuhan daktilitas menengah dihitung dengan mengasumsikan  $E$  sebesar dua kali.  $V_u$  pada sendi plastis kolom dengan kebutuhan daktilitas menengah dihitung dengan memperbesar  $E$  dengan faktor kuat-lebih  $\Omega_o$ . Nilai  $\Omega_o$  untuk sistem rangka beton bertulang pemikul momen menengah adalah 3.

$V_e$  = gaya geser desain, N

$V_e$  dihitung berdasarkan ACI 440.2R-17 Subbab 13.5.1 dan ASCE/SEI 41-13 Subbab 10.3.1.3

$k$  = koefisien dalam perhitungan kuat geser kolom berdasarkan *displacement ductility* (ASCE/SEI 41-13 Persamaan 10-3)

## 7. PERHITUNGAN $V_s$

$V_s$  dihitung menggunakan rumus pada Persamaan (20)

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \times \alpha_v \quad (20)$$

di mana:

$A_v$  = luas penampang tulangan sengkang,  $\text{mm}^2$

$f_{yt}$  = kuat leleh tulangan sengkang, MPa

$s$  = jarak antar garis pusat tulangan sengkang diukur dalam arah paralel terhadap sumbu longitudinal elemen, mm

$\alpha_v$  = faktor efektivitas sengkang (ASCE/SEI 41-13 Subbab 10.3.4)

$\alpha_v = 1$  untuk kombinasi beban gravitasi

$\alpha_v = 1/2$  untuk kombinasi beban gravitasi dan gempa jika  $s > 1/2d$

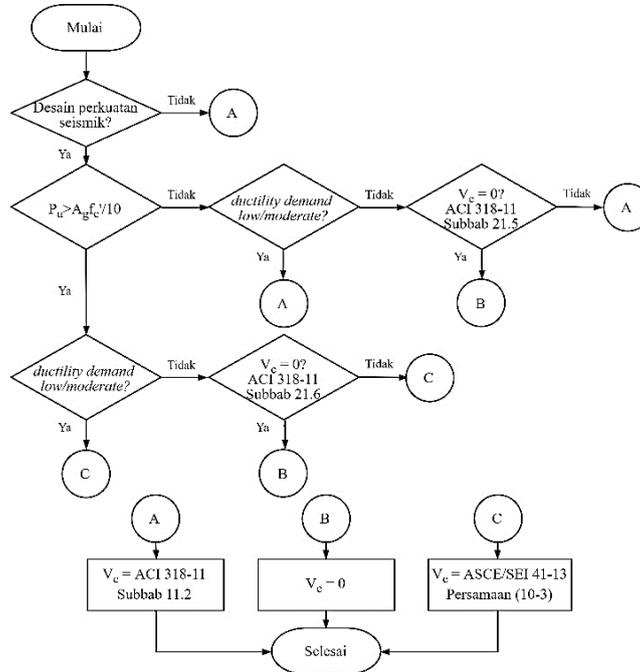
$\alpha_v = 0$  untuk kombinasi beban gravitasi dan gempa jika  $s > d$

Berdasarkan ACI 318-11 Subbab 11.4.7.9,  $V_s$  tidak boleh diambil lebih besar dari batasan pada Persamaan (21)

$$V_s \leq 0,66\sqrt{f'_c}bd \quad (21)$$

## 8. PERHITUNGAN $V_c$

Perhitungan  $V_c$  dibagi menjadi tiga, yaitu berdasarkan ACI 318-11 Bab 11, ACI 318-11 Bab 21, dan ASCE/SEI 41-13. Penentuan penggunaan rumus  $V_c$  dilakukan sesuai *flowchart* pada **Gambar 4**.



**Gambar 4.** *Flowchart* untuk Menentukan Rumus  $V_c$

## 9. PERHITUNGAN $V_f$

$V_f$  dihitung menggunakan rumus pada Persamaan (22)

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (22)$$

di mana:

$V_f$  = kuat geser nominal FRP, N

$A_{fv}$  = luas perkuatan geser FRP dengan spasi tertentu, mm<sup>2</sup> (ACI 440.2R-17 Subbab 11.4)

$f_{fe}$  = tegangan efektif pada FRP, MPa (ACI 440.2R-17 Subbab 11.4)

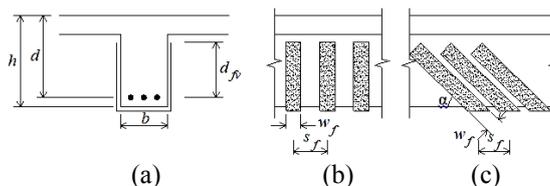
$\alpha$  = sudut antara FRP dengan sumbu longitudinal elemen yang diperkuat

$d_{fv}$  = kedalaman efektif perkuatan geser FRP, mm

=  $0,8 \times$  diameter penampang untuk penampang lingkaran

$s_f$  = jarak spasi pusat suatu potongan FRP ke pusat potongan FRP lain, mm

Variabel dimensi pada perumusan di atas dapat lebih jelas dilihat dalam **Gambar 5**.



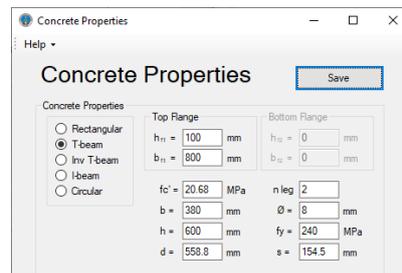
**Gambar 5.** Keterangan Variabel Dimensi untuk Potongan: (a) Penampang, (b) Memanjang dengan FRP Tegak Lurus ( $\alpha = 90^\circ$ ), dan (c) Memanjang dengan FRP Miring

## 10. METODOLOGI PENELITIAN

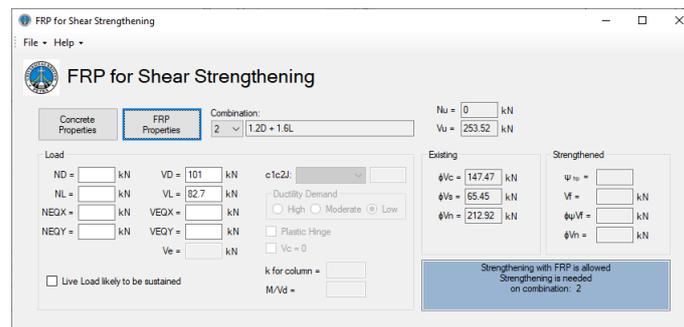
Pembuatan program dimulai dengan membaca literatur mengenai perkuatan dengan FRP. Literatur yang digunakan sebagai pedoman pembuatan program adalah ACI 440.2R-17, ASCE/SEI 41-13, dan ACI 318-11. Alat bantu perhitungan berbasis Visual Basic dibuat setelah mempelajari perhitungan desain perkuatan FRP. Sesudah program perhitungan selesai dibuat, hasil dari perhitungan program diverifikasi. Untuk perkuatan geser, verifikasi dilakukan dengan membandingkan perhitungan program dengan contoh perhitungan pada ACI 440.2R-17. Terdapat dua kasus perkuatan geser yang digunakan yaitu dari ACI 440.2R-17 Subbab 16.6 dan Subbab 16.12.

## 11. VERIFIKASI PROGRAM

Pada program perhitungan perkuatan geser, terdapat tiga *form* yaitu *form* “Concrete Properties”, *form* utama perkuatan geser, dan *form* “FRP Properties”. Pada *form* “Concrete Properties” (**Gambar 6**), *user* dapat memasukkan data penampang *existing*. Berdasarkan *input user*, program melakukan pemeriksaan terhadap syarat  $f'_c$  pada Persamaan (1) dan batasan  $V_s$  pada Persamaan (21). Pada *form* utama perkuatan geser (**Gambar 7**), *user* dapat memasukkan gaya dalam berupa aksial dan geser. Setelah *user* memasukkan gaya dalam, program akan menghitung kapasitas geser *existing*  $\phi V_n (existing)$ , gaya geser ultimit  $V_u$ , dan gaya aksial ultimit  $N_u$ . Program memeriksa  $\phi V_n (existing)$  terhadap syarat pada Persamaan (2) hingga Persamaan (4) untuk menentukan apakah perkuatan geser dengan FRP direkomendasikan. Program juga memeriksa  $\phi V_n (existing)$  terhadap  $V_u$  untuk menentukan apakah perkuatan geser dengan FRP diperlukan. Jika perkuatan dengan FRP diperlukan dan direkomendasikan, maka *form* “FRP Properties” yang sebelumnya tidak dapat diakses berubah menjadi dapat diakses.



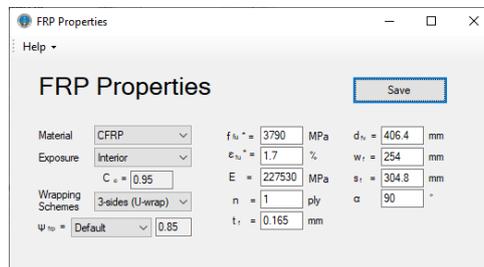
Gambar 6. Form “Concrete Properties”



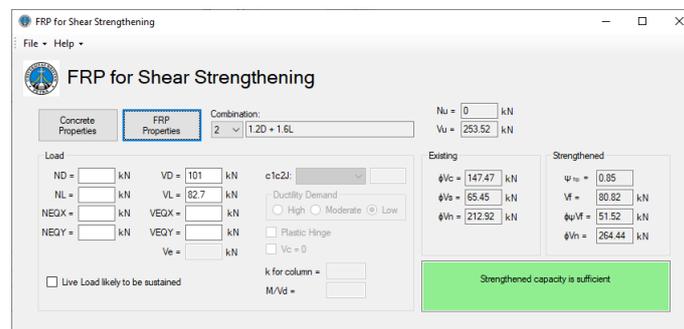
Gambar 7. Form Utama sebelum Perkuatan

Pada *form* “FRP Properties” (**Gambar 8**), *user* dapat memasukkan data FRP. Apabila perkuatan *confinement* dilakukan pada elemen segi empat yang menerima aksial, maka program akan memeriksa syarat dimensi pada Persamaan (5) hingga Persamaan (7). Berdasarkan *input data FRP* dari *user*, program akan menghitung kapasitas geser elemen yang telah diperkuat  $\phi V_n (strengthened)$ . Apabila  $\phi V_n (strengthened)$  sudah mampu menahan  $V_u$ , maka perkuatan geser dengan FRP sudah cukup. *Output* seperti notifikasi, gaya ultimit, kapasitas *existing*, dan kapasitas *strengthened* dapat dilihat dalam *form*

utama perkuatan geser (**Gambar 9**). Pada *form* utama perkuatan geser, *user* dapat memilih tipe kombinasi untuk mengeluarkan *output* gaya ultimit, kapasitas *existing*, dan kapasitas *strengthened* sesuai dengan kombinasi pilihan *user*.



**Gambar 8. Form “FRP Properties”**



**Gambar 9. Form Utama setelah Perkuatan**

Verifikasi program perhitungan dilakukan dengan cara melakukan studi kasus dari contoh perhitungan pada ACI 440.2R-17 Subbab 16.6 (kasus 1) dan Subbab 16.12 (kasus 2). Data *input* pada kasus 1 dan kasus 2 dirangkum dalam **Tabel 1**, **Tabel 2**, dan **Tabel 3**.

**Tabel 1. Data Penampang Existing**

Kasus	$f'_c$ MPa	$b$ mm	$h$ mm	$b_1$ mm	$h_1$ mm	$d$ mm	n kaki	Diameter mm	$f_y$ MPa	$s$ mm
1	20,68	380	600	800	100	558,8	2	8	240	154,5
2	27,6	406,4	406,4	-	-	371,475	2	12,8	303,4	304,8

**Tabel 2. Data Pembebanan**

Kasus	$N_D$ kN	$N_L$ kN	$N_{EQX}$ kN	$N_{EQY}$ kN	$V_D$ kN	$V_L$ kN	$V_{EQX}$ kN	$V_{EQY}$ kN	$V_e$ kN	$C_1 C_2 J$	$k$
1	-	-	-	-	101	82,7	-	-	-	-	-
2	-	-	333,62	-	-	-	-	-	286	1	0,7

**Tabel 3. Data FRP**

Kasus	Material	Exposure	Wrapping Schemes	$f_{fu}^*$ MPa	$\epsilon_{fu}^*$ mm/mm	$E$ GPa	$n$ ply	$t_f$ mm	$d_{fv}$ mm	$w_f$ mm	$s_f$ mm	$\alpha$ °
1	CFRP	Interior	3-sides (U-wrap)	3790	0,017	227,53	1	0,165	406,4	254	304,8	90
2	CFRP	Interior	Complete Wrap	1072	0,015	64,30	2	0,584	406,4	203	203	90

Dari **Tabel 4** kasus 1, dapat dilihat hasil perhitungan program/*spreadsheet* berbeda dengan hasil perhitungan ACI. Perbedaan ini terjadi karena pembulatan saat konversi satuan. Satuan yang digunakan ACI adalah *US customary units*, sedangkan program menggunakan satuan SI.

Dapat dilihat dalam **Tabel 4** kasus 2, nilai  $\phi V_s$  dari perhitungan program dan *spreadsheet* nilainya setengah dari perhitungan ACI. Hal ini dikarenakan perhitungan kekuatan nominal geser ( $V_s$ ) pada program dan *spreadsheet* telah dikalikan faktor geser ( $\alpha_v$ ). Adapun, nilai  $(\phi V_n)_{existing}$  maupun  $(\phi V_n)_{strengthened}$  dari perhitungan ACI berbeda dengan perhitungan program/*spreadsheet*. Selain akibat faktor geser, hal ini juga dikarenakan nilai  $k$  yang tidak dapat diperhitungkan dalam program. Dalam program, nilai  $k$  tidak bisa diperhitungkan jika  $N_u \leq A_g f'_c / 10$ . Oleh karena itu, jika  $N_u$  dianggap lebih besar dari  $A_g f'_c / 10$ , nilai  $V_s$  diperbarui dengan mengalikan faktor geser, serta nilai  $k$  diperhitungkan, maka nilai  $\phi V_n$  dari tiga macam perhitungan akan sama.

**Tabel 4. Perbandingan Hasil Perhitungan**

Hasil (kN)	Kasus 1			Kasus 2		
	ACI	<i>Spreadsheet</i>	Program	ACI	<i>Spreadsheet</i>	Program
$V_u$	253,50	253,52	253,52	286,00	286,00	286,00
$\phi V_c$	147,45	147,47	147,47	0	0	0
$\phi V_s$	65,40	65,45	65,45	95,20	47,58	47,58
$(\phi V_n)_{existing}$	213	212,92	212,92	66,60	47,58	47,58
$\phi \psi_f V_f$	50,04	51,52	51,52	244,00	244,17	244,17
$(\phi V_n)_{strengthened}$	263	264,44	264,44	310,60	291,75	291,75

## 12. KESIMPULAN

Program perkuatan geser menggunakan FRP yang dibuat memiliki tiga kelebihan, yaitu lengkap, akurat, dan *user-friendly*. Program yang dibuat merupakan program yang lengkap karena dapat merencanakan perkuatan terhadap beban gravitasi maupun seismik. Program merupakan program yang akurat karena telah diverifikasi dengan contoh perhitungan pada ACI 440.2R-17 Subbab 16.6 dan Subbab 16.12. Program merupakan program yang *user-friendly* karena memiliki beberapa fitur, antara lain: *input* data FRP yang fleksibel dan tidak terbatas pada merek tertentu, dapat menyimpan hasil perhitungan dalam dokumen Microsoft Word, dan dapat memberikan notifikasi yang lengkap dan informatif. Notifikasi pada program ini dapat menunjukkan apakah elemen direkomendasikan untuk diperkuat dengan FRP. Notifikasi pada program ini juga dapat mencantumkan tipe kombinasi yang membutuhkan perkuatan. Setelah perkuatan, notifikasi juga dapat mencantumkan tipe kombinasi yang kapasitas *strengthened*-nya masih tidak cukup.

## 13. DAFTAR REFERENSI

- ACI Committee 318. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- ACI Committee 440. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13)*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.