



Pengaruh Kekangan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* pada Beton *Self Compacting* Menggunakan Agregat Kasar Daur Ulang terhadap Perilaku Beton

*Martinus P. Sapeai, Johannes A. Tjondro

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

*) martinus22mps@gmail.com

Received: 23 Maret 2020 Revised: 27 Oktober 2020 Accepted: 5 November 2020

Abstract

Utilization of recycled concrete waste as an alternative to natural coarse aggregates in this experiment is in accordance with the concept of sustainable construction, with the self compacting concrete method. The concept of making test specimens is in accordance with real conditions in the field, where aggregates do not go through a cleaning process. Reinforcement of concrete elements using fibers that have been axially loaded has been widely implemented both as a fully wrapped and partially wrapped. There are three variants of mix design with an average compressive strength of 28 days required of 24, 28 and 32 MPa, respectively. There are three variants of CFRP as restraints on concrete cylinders, respectively 50, 75 and 100%. This experimental test shows that the SCC-RCA concept using ACI 211.1 meets the requirements. The effect of CFRP restraint on the compressive strength of SCC-RCA concrete restrained by one layer of CFRP produces the following equation $f_{cc}' = f_{c'} + 3,7f_l$.

Keywords: Recycled coarse aggregates, sustainable construction, self compacting concrete, compressive strength of concrete, carbon fiber reinforced polymer

Abstrak

Pemanfaatan limbah beton yang telah didaur ulang (RCA) sebagai alternatif pengganti agregat kasar alami dalam eksperimen ini sesuai dengan konsep konstruksi berkelanjutan, dengan metode beton memadat sendiri. Konsep pembuatan benda uji sesuai kondisi riil di lapangan, di mana agregat tidak melalui proses pembersihan. Perkuatan elemen beton menggunakan serat yang diberi beban secara aksial telah banyak diimplementasikan baik yang ditekang secara menyeluruh maupun yang ditekang secara parsial. Terdapat tiga varian mix design dengan kekuatan tekan rata-rata 28 hari yang disyaratkan masing-masing 24, 28 dan 32 MPa. Terdapat tiga varian carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sebagai kekangan pada silinder beton masing-masing adalah kekangan 50, 75 dan 100%. Uji eksperimen ini menunjukkan bahwa konsep SCC-RCA menggunakan ACI 211.1 memenuhi syarat. Pengaruh kekangan CFRP pada kekuatan tekan beton SCC-RCA yang ditekang satu lapis CFRP menghasilkan persamaan sebagai berikut $f_{cc}' = f_{c'} + 3,7f_l$.

Kata Kunci: Agregat kasar daur ulang, konstruksi berkelanjutan, beton memadat sendiri, kekuatan tekan beton, carbon fiber reinforced polymer

Pendahuluan

Pemanfaatan limbah beton sebagai agregat daur ulang pengganti agregat alami dalam pembuatan beton baru merupakan salah satu jawaban terkait konsep konstruksi berkelanjutan (*sustainable construction*). Limbah beton bersumber dari sisa saat pelaksanaan pengecoran, pembongkaran bangunan lama (masa layan, bencana alam),

perbaikan (rehabilitasi, renovasi dan restorasi) bangunan, benda uji beton dan lainnya. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan terkait pemanfaatan limbah beton sebagai material pengganti agregat.

Sifat mekanikal beton menurun, antara lain: kekuatan tekan menurun sekitar 10% sampai dengan 30%, kekuatan tarik menurun kurang dari

10% dan modulus elastisitas menurun sekitar 10% sampai dengan 40% (El-Reddy, 2009). Aplikasi beton daur ulang di antaranya: *roadway infrastructure, capping layer, selective fill, bulk fill, concrete pavement, hardcore filling, brick dan blocks* (Tam *et al.*, 2018).

Inovasi pada beton memadat sendiri (*self compacting concrete*) yang umum disebut SCC telah banyak dikembangkan oleh perusahaan kimia yang bekerja sama dengan perusahaan semen dan juga dari kalangan akademis melakukan penelitian terkait beton SCC ini. Beton dengan *admixture* tambahan (*superplasticizer*) tidak mempengaruhi *setting time* beton melainkan mempengaruhi *slump loss* dari beton tersebut. Beton SCC ini lebih banyak digunakan pada konstruksi dengan klasifikasi khusus.

Menurut Zhu, *et al.* (2001) untuk kekuatan tekan beton yang dihasilkan tidak ada perbedaan yang signifikan antara beton konvensional dan beton dengan konsep SCC, penelitian dilakukan dengan metode *cast in situ* dengan catatan pemadatan beton konvensional dilaksanakan secara tepat. Berbeda dengan kekuatan tekan untuk kekuatan lentur beton dengan konsep SCC memiliki nilai kekuatan lentur yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan beton konvensional (Sonebi & Bartos, 2001).

Pada konstruksi yang tidak memenuhi persyaratan ACI 440.2R-17 wajib dilakukan perbaikan atau perkuatan. Terdapat dua jenis perkuatan pada suatu konstruksi yaitu perkuatan lokal (masing-masing elemen struktur, seperti: pelat, balok dan kolom atau sambungan struktur/*joint*) dan perkuatan global (perbaikan struktur bangunan secara menyeluruh). Perbaikan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan rencana (Tavio *et al.*, 2009).

Pemilihan metode FRP *jacketing* digunakan karena material FRP lebih ringan, memiliki kekuatan tinggi dan modulus yang tinggi serta tahan terhadap korosi. Metode FRP *jacketing* dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan tekan beton (Nanni & Bradford, 1995; Toutanji, 1999). Peningkatan kekuatan tekan dan peningkatan daktilitas beton dengan FRP *jacketing* berpengaruh juga pada perilaku beton terutama pada tegangan-regangan beton (Xiao & Wu, 2003).

Menurut Zeng *et al.* (2018) *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) strip sebagai kekangan memiliki peningkatan kekuatan tekan dan kapasitas deformasi aksial yang lebih tinggi hampir sama dengan CFRP sebagai kekangan penuh. Menurut Guo *et al.* (2016) CFRP sangat meningkatkan

kinerja tekan pada beton utuh dan pada beton yang sudah rusak. Ketika tekanan pengekan CFRP kecil, sangat signifikan berpengaruh terhadap kekuatan ultimit dan regangan aksial pada beton normal sedangkan pada beton mutu tinggi tidak terlalu berpengaruh.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan proporsi campuran beton dan mendapatkan tegangan-regangan serta modulus elastisitas SCC-RCA menggunakan metode beton normal, dan untuk mendapatkan nilai koefisien tekanan lateral (k_1) dalam menentukan kekuatan tekan beton terkekang CFRP (f_{cc}') satu lapis baik secara parsial maupun menyeluruh.

Model persamaan peningkatan kekuatan tekan beton yang dikekang FRP (f_{cc}') telah banyak diusulkan pada beberapa hasil penelitian sebelumnya yang dirangkum pada Tabel 1. Untuk mempermudah dalam analisis perbandingan hasil eksperimental terhadap beberapa model persamaan pada Tabel 1, maka dibuat persamaan umum (1) untuk analisis selanjutnya.

$$\frac{f_{cc}'}{f_c} = \alpha + k_1 * \beta \quad (1)$$

Tabel 1. Model persamaan kekuatan tekan beton yang dikekang FRP

| Model | Usulan | α | k_1 | β |
|-------|------------------------------|----------|-------|--------------------|
| 1.1 | Benzaid & Mesbah, 2014 | 1 | 1,6 | (f_i/f_c) |
| 1.2 | Wei & Wu, 2012 | 1 | 2,2 | $(f_i/f_c)^{0.94}$ |
| 1.3 | Xiao <i>et al.</i> , 2010 | 1 | 3,2 | $(f_i/f_c)^{0.80}$ |
| 1.4 | Teng <i>et al.</i> , 2007 | 1 | 3,5 | (f_i/f_c) |
| 1.5 | Youssef <i>et al.</i> , 2007 | 1 | 2,3 | $(f_i/f_c)^{1.25}$ |
| 1.6 | Wu <i>et al.</i> , 2006 | 0,8 | 2,5 | (f_i/f_c) |
| 1.7 | Lam & Teng, 2003* | 1 | 3,3 | (f_i/f_c) |
| 1.8 | Lam & Teng, 2002 | 1 | 2,0 | (f_i/f_c) |

Keterangan: ACI 440.2R-17

Metode

Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen tipe PCC yang diproduksi oleh PT. Tiga Roda, agregat halus alami (pasir hitam/pasir beton), dan lolos saringan No. 4 (4,75 mm), agregat kasar daur ulang (RCA) dengan ukuran maksimum 9,50 mm, air tanah di Laboratorium Teknik Struktur Universitas Katolik Parahyangan, *superplasticizer* tipe ViscoCrete 3115N yang diproduksi oleh PT. Sika Indonesia, FRP serat

carbon tipe SikaWrap 231C yang diproduksi oleh PT. Sika Indonesia, resin perekat tipe Sikadur 330 yang diproduksi oleh PT Sika Indonesia.

Propertis agregat

Tabel 2. Hasil pemeriksaan propertis agregat

| Agg. | Kd. air (%) | FM | Berat isi padat (gr/cm ³) | SG | Absorpsi (%) |
|-------|-------------|------|---------------------------------------|------|--------------|
| Pasir | 7,31 | 2,59 | - | 2,53 | 4,01 |
| RCA | 3,03 | - | 1,19 | 2,54 | 4,96 |

Spesifikasi dan karakteristik agregat sebagai material penyusun beton dapat diperoleh dengan cara melakukan pemeriksaan propertis di laboratorium. Pemeriksaan agregat ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik dari agregat yang diperlukan dalam perhitungan proporsi campuran beton (*mix design*) sesuai dengan kekuatan tekan rencana. Pemeriksaan agregat (Tabel 2) diperoleh berdasarkan hasil penelitian sebelumnya (Sapeai & Tjondro, 2020) dengan jenis dan kondisi agregat yang sama.

Proporsi campuran beton

Perancangan proporsi campuran beton (*mix design*) dihitung berdasarkan hasil pemeriksaan propertis agregat (Tabel 2). Untuk perancangan proporsi campuran beton (Tabel 3) SCC-RCA ini menggunakan perhitungan untuk beton normal yang berpedoman pada ACI 211.1-91.

Tabel 3. Proporsi campuran beton

| Mix design | Unit | 1 | 2 | 3 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| <i>f_{cr} Design</i> | (MPa) | 24,00 | 28,00 | 32,00 |
| <i>Size of Agg.</i> | (mm) | 9,50 | 9,50 | 9,50 |
| Air | (kg) | 4,24 | 4,26 | 4,29 |
| Semen | (kg) | 7,50 | 8,29 | 9,27 |
| RCA | (kg) | 12,21 | 12,21 | 12,21 |
| Pasir | (kg) | 23,33 | 22,51 | 21,51 |
| ViscoCrete | (%) | 3,00 | 2,50 | 2,00 |
| 3115N | (kg) | 0,23 | 0,21 | 0,19 |

Pembebanan tekan beton

Pada pengujian pembebanan tekan beton menggunakan UTM diperoleh beban tekan (P) dan *displacement* (ΔH) untuk selanjutnya dilakukan perhitungan kekuatan tekan beton (Persamaan 2) dan regangan tekan beton (Persamaan 3). Pengujian pembebanan tekan beton dilaksanakan setelah umur 28 hari terhadap masing-masing benda uji silinder beton (Tabel 4).

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad (2)$$

$$\epsilon_c = \frac{\Delta H}{H} \quad (3)$$

Tabel 4. Varian benda uji silinder beton

| Benda uji | Jumlah benda uji | Kekuatan tekan | |
|--------------|------------------|--|----------------------|
| | | rata-rata 28 hari (<i>mix design</i>) f_{cr} | Luasan kekangan cfrp |
| | | (Buah) | (MPa) |
| SR1 | 3 | | 0% |
| SRF.1A | 3 | | 50% |
| SRF.1B | 3 | 24 | 75% |
| SRF.1C | 3 | | 100% |
| SR2 | 3 | | 0% |
| SRF.2A | 3 | | 50% |
| SRF.2B | 3 | 28 | 75% |
| SRF.2C | 3 | | 100% |
| SR3 | 3 | | 0% |
| SRF.3A | 3 | | 50% |
| SRF.3B | 3 | 32 | 75% |
| SRF.3C | 3 | | 100% |
| Total | 36 | | |

Pembebanan tekan beton yang dikekang FRP

Beton yang dikekang FRP Gambar 1(b) memiliki sifat yang berbeda dengan beton yang dikekang baja (tulangan pengekang) Gambar 1(a), karena beton yang dikekang baja diasumsikan memiliki tekanan lateral (f_l) yang konstan mengikuti leleh dari baja sedangkan beton yang dikekang FRP tetap dalam kondisi linier elastis hingga elemen beton yang dikekang mengalami keruntuhan (hancur) di mana tekanan lateral meningkat terus seiring beban yang diberikan. Persamaan tekanan lateral (Persamaan 4) pada beton yang dikekang CFRP secara menyeluruh (*fully wrapped*) sketsa pada Gambar 2(c), berbeda dengan tekanan lateral pada beton yang dikekang secara parsial (*partially wrapped*) pada sketsa Gambar 2(a) dan Gambar 2(b). Perbedaannya berdasarkan *volumetric ratio* (ρ_f) dimana untuk terkekang menyeluruh menggunakan Persamaan (5) sedangkan untuk terkekang secara parsial menggunakan Persamaan (6) (Wu *et al.*, 2006).

$$f_l = \frac{\rho_f * f_f}{2} \quad (4)$$

$$\rho_f = \frac{4 * t_f}{D} \quad (5)$$

$$\rho_f = \frac{4 * t_f * b_f}{D * (b_f + s_f)} \quad (6)$$

Modulus elastisitas beton

Beberapa penelitian terkait dengan modulus elastisitas beton memadat sendiri yaitu: penelitian pertama menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas beton SCC lebih rendah 10% sampai

dengan 15% dari beton konvensional (Bennenk, 2002), penelitian kedua menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas beton SCC sama dengan beton konvensional (Persson, 1999). Modulus elastisitas merupakan kemiringan garis singgung (*slope* dari garis lurus yang ditarik) dari kondisi nol hingga tegangan mencapai $0,5 f_c'$ pada kurva tegangan-regangan beton. Perhitungan nilai modulus elastisitas berdasarkan kurva tegangan-regangan hasil eksperimental (Persamaan 7) dibandingkan terhadap persamaan empiris (Persamaan 8).

$$EcE = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (7)$$

$$EcT = 4700 * \sqrt{f_c'} \quad (8)$$

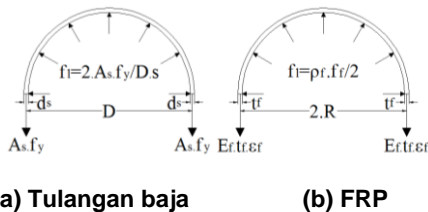
$$f_c' = f_{c28} - k * d \quad (9)$$

Pembebanan tarik CFRP

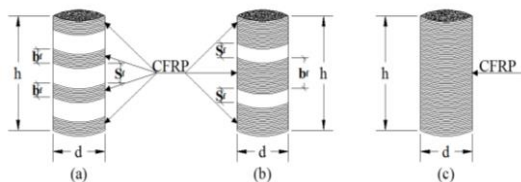
Prosedur pengujian pembebanan tarik CFRP berpedoman pada ASTM D3039/D3039M-00, pada pengujian pembebanan tarik CFRP menggunakan UTM diperoleh beban tarik (P_f) dan *displacement* (Δp_f) untuk selanjutnya dilakukan perhitungan kekuatan tarik CFRP (Persamaan 10) dan regangan tarik CFRP (Persamaan 11).

$$ff = \frac{P_f}{A_f} \quad (10)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta p_f}{p_f} \quad (11)$$



Gambar 1. Sketsa tekanan lateral beton terkekang



Gambar 2. Sketsa benda uji silinder beton yang dikekang CFRP varian (a) SRF.A 50% (b) SRF.B 75% (c) SRF.C 100%

Perhitungan modulus elastisitas CFRP adalah perbandingan antara kekuatan tarik CFRP terhadap regangan tarik CFRP (Persamaan 12), hal ini karena grafik tegangan regangan CFRP bersifat linier (langsung hancur saat mengalami beban puncak,

tidak mengalami kelelahan). Pengujian pembebanan tarik CFRP dilaksanakan setelah umur 3 hari terhadap masing-masing benda uji CFRP (Tabel 5).

$$E_f = \frac{ff}{\varepsilon_f} \quad (12)$$

Tabel 5. Varian benda uji CFRP

| Benda Uji | Panjang P _f (mm) | Lebar B _f (mm) | Tebal T _f (mm) | Jumlah (buah) |
|--------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| NSd1 | 150,01 | 10,00 | 0,129 | 1 |
| NSd2 | 150,03 | 10,00 | 0,129 | 1 |
| NSd3 | 250,06 | 18,00 | 0,129 | 1 |
| NSd4 | 250,04 | 18,00 | 0,129 | 1 |
| Total | | | | 4 |

Hasil dan Pembahasan

Slump flow

Pada penelitian eksperimental ini menggunakan dua jenis pengujian nilai *slump flow* yaitu *slump flow by abrams cone* dan T_{50cm} . Berdasarkan EFNARC 2002 nilai *slump flow by abrams cone* berkisar antara 650 sampai dengan 800 mm (± 50 mm) sedangkan untuk T_{50cm} berkisar antara tiga sampai dengan tujuh detik (*civil engineering*) dan dua sampai dengan lima detik (*houshing aplication*), nilai *slump flow* tersebut digunakan untuk agregat dengan ukuran maksimum 20 mm.

Selain dari standar rujukan tersebut di atas untuk nilai *slump flow by abrams cone* juga berpedoman pada EFCA 2005 di mana nilai *slump flow* berkisar antara 550 sampai dengan > 800 mm. Berdasarkan dua standar rujukan yang berlaku di atas maka untuk beton dengan konsep SCC-RCA menggunakan perhitungan untuk beton normal yang berpedoman pada ACI 211.1-91 memenuhi syarat dan dapat dilaksanakan, dengan catatan tetap melakukan *trial mix*.

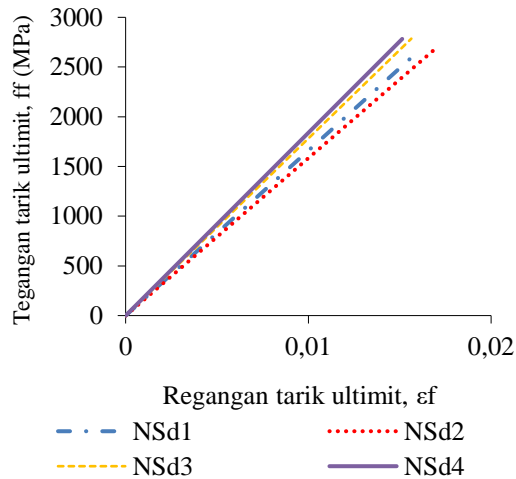
Tabel 6. Nilai *slump flow*

| Mix design | Kekuatan tekan rancangan beton f_{cr} (mpa) | Visco Crete 3115n (%) | Abrams cone (mm) | T_{50cm} (detik) |
|------------|---|-----------------------|------------------|--------------------|
| | 1 | 24 | 3,00 | 587,50 |
| 2 | 28 | 2,50 | 615,00 | 5,80 |
| 3 | 32 | 2,00 | 647,50 | 5,20 |

Perilaku CFRP

Pada pengujian pembebanan tarik CFRP ini terdapat empat buah benda uji CFRP (Tabel 5).

Pengujian pembebanan tarik ini diperoleh nilai beban tarik (P_f) dan *displacement* (Δp_f) kemudian dihitung perilaku dari CFRP di antaranya adalah: nilai kekuatan tarik ultimit (Persamaan 10), regangan tarik ultimit (Persamaan 11) dan modulus elastisitas (Persamaan 12) yang disajikan pada Tabel 7 kemudian nilai tegangan-regangan diploting dapat dilihat pada Gambar 3. Pada analisis selanjutnya nilai tegangan-regangan dan modulus elastisitas CFRP berdasarkan hasil eksperimental yang disajikan pada Tabel 7.



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan CFRP hasil eksperimental

Perilaku SCC-RCA

Pada pengujian pembebanan tekan beton SCC-RCA (tanpa kekangan) ini terdapat sembilan buah benda uji silinder beton SCC-RCA (tanpa kekangan) dengan tiga varian kekuatan tekan beton rata-rata 28 hari rencana (Tabel 1). Pengujian pembebanan tekan ini diperoleh nilai beban tekan (P) dan *displacement* (ΔH) kemudian dihitung perilaku dari beton SCC-RCA di antaranya adalah: nilai kekuatan tekan (σ_2), regangan aksial (ε_2) dan modulus elastisitas (E_c) yang disajikan pada Tabel 8. Kekuatan tekan beton SCC-RCA rata-rata 28 hari rencana yang diperoleh dari hasil eksperimental ini lebih tinggi dari pada kekuatan tekan beton SCC-RCA rata-rata 28 hari rencana (Tabel 8) dengan rasio perbandingan (f_{ci}/f_{cr}) sebesar 1,06 sampai dengan 1,21 untuk M1, 1,19 sampai dengan 1,21 untuk M2 dan 1,09 sampai dengan 1,19 untuk M3.

Pada Tabel 8 dapat dilihat terdapat bilai tegangan (σ_2 & σ_1) dan regangan (ε_2) untuk masing-masing benda uji SCC-RCA, untuk nilai modulus elastisitas rata-rata yang dihitung berdasarkan hasil eksperimental beton SCC-RCA (7) mengalami penurunan sebesar 38% sampai dengan 43% terhadap nilai modulus elastisitas yang dihitung berdasarkan persamaan empiris (8), persamaan modulus elastisitas beton SCC-RCA adalah:

$$E_c = 2500\sqrt{f_c'} \quad (13)$$

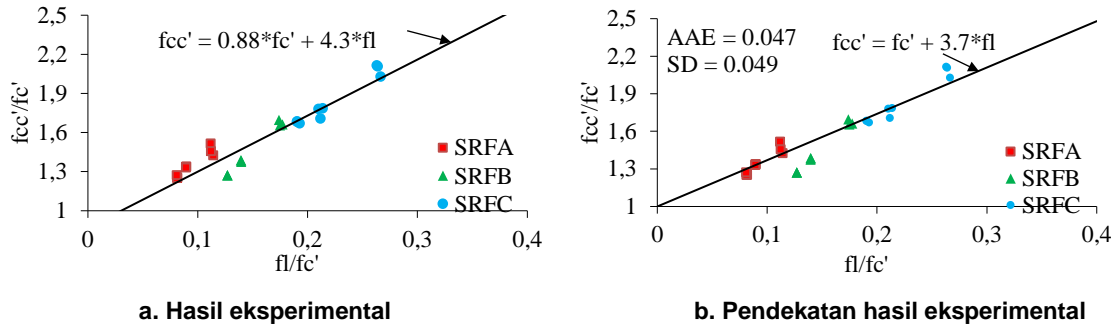
Tabel 7. Perilaku CFRP

| Benda uji cfrp | Kekuatan tarik ultimit | | Regangan tarik ultimit | | Modulus elastisitas | |
|----------------|------------------------|---------|------------------------|----------|---------------------|-----------|
| | F_{fi} | F_f | E_{fui} | E_{fu} | E_{fi} | E_f |
| | (mpa) | (mpa) | | | (mpa) | (mpa) |
| NSd1 | 2676,54 | | 1,61% | | 165925,98 | |
| NSd2 | 2675,23 | 2729,97 | 1,69% | 1,59% | 158350,99 | 171572,42 |
| NSd3 | 2785,34 | | 1,56% | | 178161,10 | |
| NSd4 | 2782,76 | | 1,51% | | 183851,63 | |

Tabel 8. Perilaku SCC-RCA

| Benda uji | Kekuatan tekan beton | | Regangan aksial beton | | Tegangan | | Regangan ε_2 | Modulus elastisitas | | | |
|-----------|----------------------|-------|-----------------------|-----------------|------------|------------|--------------------------|---------------------|----------|-----|-----|
| | f_{ci} | f_c | ε_{ci} | ε_c | σ_2 | σ_1 | | E_{cE} | E_{cT} | AE | AAE |
| | (MPa) | (MPa) | | | (MPa) | (MPa) | (GPa) | (GPa) | (%) | (%) | |
| SR1-1 | 28,97 | | 0,0029 | | 11,59 | 0,65 | 0,0009 | 13,09 | 22,18 | 41% | |
| SR1-2 | 25,95 | 26,82 | 0,0028 | 0,0027 | 10,38 | 0,61 | 0,0009 | 12,20 | 20,62 | 41% | 40% |
| SR1-3 | 25,56 | | 0,0025 | | 10,22 | 0,64 | 0,0008 | 12,81 | 20,41 | 37% | |
| SR2-1 | 33,52 | | 0,0029 | | 13,41 | 0,75 | 0,0009 | 14,98 | 24,34 | 38% | |
| SR2-2 | 33,90 | 33,60 | 0,0028 | 0,0028 | 13,56 | 0,79 | 0,0009 | 15,80 | 24,51 | 36% | 38% |
| SR2-3 | 33,39 | | 0,0029 | | 13,36 | 0,74 | 0,0009 | 14,83 | 24,28 | 39% | |
| SR3-1 | 35,03 | | 0,0029 | | 14,01 | 0,74 | 0,0009 | 14,78 | 25,02 | 41% | |
| SR3-2 | 37,91 | 36,99 | 0,0028 | 0,0028 | 15,16 | 0,72 | 0,0010 | 14,50 | 26,26 | 45% | 43% |
| SR3-3 | 38,03 | | 0,0026 | | 15,17 | 0,75 | 0,0010 | 15,04 | 26,31 | 43% | |

Keterangan: AE = absolute error, AAE = absolute average error



Gambar 4. Persamaan hasil eksperimental

Tabel 9. Perilaku SCC-RCA-CFRP

| Benda uji silinder | Mode I (Mi) | Conf. (%) | Kekuatan tekan yang dikekang CFRP | Regangan tekan yang dikekang CFRP | Tekanan lateral CFRP | Rasio hasil eksperimental | |
|--------------------|-------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------|-----------|
| | | | f_{cc}' (MPa) | ϵ_{ccu} | f_l (MPa) | f_{cc}'/f_c | f_l/f_c |
| SRF1A-1 | 1 | 50 | 38,19 | 0,0051 | 3,06 | 1,42 | 0,11 |
| SRF1A-2 | | | 40,66 | 0,0060 | 3,00 | 1,52 | 0,11 |
| SRF1A-3 | | | 39,05 | 0,0059 | 3,01 | 1,46 | 0,11 |
| SRF1B-1 | | 75 | 44,40 | 0,0078 | 4,69 | 1,66 | 0,17 |
| SRF1B-2 | | | 44,57 | 0,0056 | 4,76 | 1,66 | 0,18 |
| SRF1B-3 | | | 45,50 | 0,0067 | 4,66 | 1,70 | 0,17 |
| SRF1C-1 | | 100 | 46,06 | 0,0085 | 7,06 | 1,72 | 0,26 |
| SRF1C-2 | | | 45,99 | 0,0082 | 7,08 | 1,71 | 0,26 |
| SRF1C-3 | | | 41,00 | 0,0071 | 7,16 | 1,53 | 0,27 |
| SRF1C-1 | | 100* | 56,72 | - | 7,06 | 2,11 | 0,26 |
| SRF1C-2 | | | 56,52 | - | 7,08 | 2,11 | 0,26 |
| SRF1C-3 | | | 54,39 | - | 7,16 | 2,03 | 0,27 |
| SRF2A-1 | 2 | 50 | 44,94 | 0,0053 | 3,02 | 1,34 | 0,09 |
| SRF2A-2 | | | 44,85 | 0,0047 | 3,01 | 1,33 | 0,09 |
| SRF2A-3 | | | 44,69 | 0,0047 | 3,01 | 1,33 | 0,09 |
| SRF2B-1 | | 75 | 46,50 | 0,0074 | 4,70 | 1,38 | 0,14 |
| SRF2B-2 | | | 46,16 | 0,0064 | 4,69 | 1,37 | 0,14 |
| SRF2B-3 | | | 46,59 | 0,0079 | 4,69 | 1,39 | 0,14 |
| SRF2C-1 | | 100 | 47,18 | 0,0080 | 7,19 | 1,40 | 0,21 |
| SRF2C-2 | | | 47,01 | 0,0079 | 7,07 | 1,40 | 0,21 |
| SRF2C-3 | | | 41,01 | 0,0063 | 7,12 | 1,22 | 0,21 |
| SRF2C-1 | | 100* | 59,99 | - | 7,19 | 1,79 | 0,21 |
| SRF2C-2 | | | 59,81 | - | 7,07 | 1,78 | 0,21 |
| SRF2C-3 | | | 57,31 | - | 7,12 | 1,71 | 0,21 |
| SRF3A-1 | 3 | 50 | 46,23 | 0,0045 | 3,02 | 1,25 | 0,08 |
| SRF3A-2 | | | 46,22 | 0,0056 | 3,01 | 1,25 | 0,08 |
| SRF3A-3 | | | 46,97 | 0,0056 | 3,00 | 1,27 | 0,08 |
| SRF3B-1 | | 75 | 46,96 | 0,0077 | 4,70 | 1,27 | 0,13 |
| SRF3B-2 | | | 46,97 | 0,0079 | 4,70 | 1,27 | 0,13 |
| SRF3B-3 | | | 46,97 | 0,0079 | 4,70 | 1,27 | 0,13 |
| SRF3C-1 | | 100 | 47,06 | 0,0081 | 7,04 | 1,27 | 0,19 |
| SRF3C-2 | | | 47,48 | 0,0082 | 7,04 | 1,28 | 0,19 |
| SRF3C-3 | | | 45,27 | 0,0077 | 7,13 | 1,22 | 0,19 |
| SRF3C-1 | | 100* | 62,16 | - | 7,04 | 1,68 | 0,19 |
| SRF3C-2 | | | 62,23 | - | 7,04 | 1,68 | 0,19 |
| SRF3C-3 | | | 61,70 | - | 7,13 | 1,67 | 0,19 |

* Pengujian CTM

Tabel 10. Rasio kekuatan tekan SCC-RCA-CFRP terhadap SCC-RCA

| Benda uji silinder | Hasil eksp. | Pendekatan eksp. | Benzaid & Mesbah, 2014 | Wei & Wu, 2012 <i>et al.</i> , 2010 | Xiao, 2010 | Teng, 2007 <i>et al.</i> , 2006 | Youssef, 2007 <i>et al.</i> , 2006 | Wu, 2006 |
|--------------------|----------------|------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------|
| | f_{ccE0}/f_c | f_{ccE}/f_c | f_{cc}/f_c | f_{cc}/f_c | f_{cc}/f_c | f_{cc}/f_c | f_{cc}/f_c | f_{cc}/f_c |
| SRF1A-1 | 1,42 | 1,42 | 1,18 | 1,23 | 1,30 | 1,40 | 1,34 | 1,04 |
| SRF1A-2 | 1,52 | 1,41 | 1,18 | 1,23 | 1,29 | 1,39 | 1,33 | 1,03 |
| SRF1A-3 | 1,46 | 1,42 | 1,18 | 1,23 | 1,29 | 1,39 | 1,33 | 1,03 |
| SRF1B-1 | 1,66 | 1,65 | 1,28 | 1,35 | 1,42 | 1,61 | 1,58 | 1,19 |
| SRF1B-2 | 1,66 | 1,66 | 1,28 | 1,36 | 1,42 | 1,62 | 1,59 | 1,19 |
| SRF1B-3 | 1,70 | 1,64 | 1,28 | 1,35 | 1,41 | 1,61 | 1,58 | 1,18 |
| SRF1C-1 | 2,11 | 1,97 | 1,42 | 1,51 | 1,58 | 1,92 | 1,96 | 1,41 |
| SRF1C-2 | 2,11 | 1,98 | 1,42 | 1,52 | 1,58 | 1,92 | 1,97 | 1,41 |
| SRF1C-3 | 2,03 | 1,99 | 1,43 | 1,52 | 1,58 | 1,93 | 1,98 | 1,42 |
| SRF2A-1 | 1,34 | 1,33 | 1,14 | 1,18 | 1,23 | 1,31 | 1,27 | 0,97 |
| SRF2A-2 | 1,33 | 1,33 | 1,14 | 1,18 | 1,23 | 1,31 | 1,27 | 0,97 |
| SRF2A-3 | 1,33 | 1,33 | 1,14 | 1,18 | 1,23 | 1,31 | 1,26 | 0,97 |
| SRF2B-1 | 1,38 | 1,52 | 1,22 | 1,28 | 1,33 | 1,49 | 1,46 | 1,10 |
| SRF2B-2 | 1,37 | 1,52 | 1,22 | 1,28 | 1,33 | 1,49 | 1,46 | 1,10 |
| SRF2B-3 | 1,39 | 1,52 | 1,22 | 1,28 | 1,33 | 1,49 | 1,46 | 1,10 |
| SRF2C-1 | 1,79 | 1,79 | 1,34 | 1,42 | 1,47 | 1,75 | 1,79 | 1,28 |
| SRF2C-2 | 1,78 | 1,78 | 1,34 | 1,41 | 1,46 | 1,74 | 1,77 | 1,28 |
| SRF2C-3 | 1,71 | 1,78 | 1,34 | 1,41 | 1,46 | 1,74 | 1,78 | 1,28 |
| SRF3A-1 | 1,25 | 1,30 | 1,13 | 1,17 | 1,21 | 1,29 | 1,24 | 0,95 |
| SRF3A-2 | 1,25 | 1,30 | 1,13 | 1,17 | 1,21 | 1,28 | 1,24 | 0,95 |
| SRF3A-3 | 1,27 | 1,30 | 1,13 | 1,17 | 1,21 | 1,28 | 1,24 | 0,95 |
| SRF3B-1 | 1,27 | 1,47 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,44 | 1,42 | 1,07 |
| SRF3B-2 | 1,27 | 1,47 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,44 | 1,42 | 1,07 |
| SRF3B-3 | 1,27 | 1,47 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,44 | 1,42 | 1,07 |
| SRF3C-1 | 1,68 | 1,70 | 1,30 | 1,37 | 1,42 | 1,67 | 1,70 | 1,23 |
| SRF3C-2 | 1,68 | 1,70 | 1,30 | 1,37 | 1,42 | 1,67 | 1,70 | 1,23 |
| SRF3C-3 | 1,67 | 1,71 | 1,31 | 1,38 | 1,42 | 1,67 | 1,71 | 1,23 |

Perilaku SCC-RCA-CFRP

Pada pengujian pembebanan tekan beton SCC-RCA-CFRP (terkekang CFRP) ini terdapat 27 (dua puluh tujuh) buah benda uji silinder beton SCC-RCA-CFRP dengan tiga varian kekuatan tekan beton rata-rata 28 hari rencana dan tiga varian luasan kekangan CFRP, yaitu 50%, 75% dan 100% dihitung berdasarkan luasan selimut silinder beton (Tabel 2).

Pada awalnya pengujian pembebanan tekan silinder beton menggunakan UTM dan diperoleh nilai beban tekan (P) dan *displacement* (ΔH), sedangkan untuk luasan kekangan CFRP 100% dengan menggunakan UTM benda uji silinder beton sudah mulai retak tetapi CFRP belum pecah dan beton belum hancur. Oleh karena itu untuk benda uji beton yang dikekang CFRP 100% dilakukan pembebanan tekan kembali menggunakan CTM di mana nilai yang diperoleh dengan alat CTM hanya beban tekan (P) saja.

Dari nilai yang diperoleh dari hasil pengujian pembebanan tekan tersebut, kemudian dihitung perilaku dari beton SCC-RCA-CFRP di antaranya adalah: nilai kekuatan tekan (2) dan regangan aksial

ultimit (3) sedangkan untuk tekanan lateral pada beton SCC-RCA yang dikekang CFRP dihitung menggunakan persamaan (4; 5; 6) hasil dari perhitungan disajikan pada Tabel 9.

Nilai rasio hasil eksperimental antara peningkatan kekuatan tekan beton SCC-RCA yang dikekang CFRP dan tekanan lateral akibat kekangan CFRP terhadap kekuatan tekan beton SCC-RCA (tanpa kekangan) diploting ke dalam grafik pada Gambar 4(a) guna menentukan suatu persamaan. Pada Gambar 4(a) diperoleh suatu persamaan peningkatan kekuatan tekan beton hasil eksperimental (14).

$$f_{cc'} = 0,88 * f_{c'} + 4,3 * f_l \quad (14)$$

Kekuatan tekan beton yang dikekang CFRP

Persamaan (14) yang diperoleh dari hasil eksperimental terdapat koefisien pada kekuatan tekan beton tanpa kekangan sebesar 0,88 (kurang dari 1,00). Tidak mungkin nilai kekuatan tekan beton tanpa kekangan kurang dari 1,00, maka dengan melakukan pendekatan yang mendekati hasil eksperimental persamaan (14) menjadi

persamaan (15) di mana pada persamaan (15) koefisien 0,88 sudah menjadi 1,00 dan koefisien tekanan lateral semula 4,3 menjadi 3,7.

Hasil perhitungan pendekatan persamaan peningkatan kekuatan tekan beton yang dikekang CFRP hasil eksperimental (15) diploting ke dalam grafik pada Gambar 4.(b). Pada Gambar 4.(b) dilihat nilai rata-rata eror hanya sebesar 4,70%. Dengan demikian persamaan (15) yang merupakan pendekatan hasil eksperimental dapat digunakan.

$$f_{cc'} = f_c' + 3,7 * f_l \quad (15)$$

Perbandingan model persamaan beton yang dikekang CFRP

Kekuatan tekan beton terkekang CFRP dihitung menggunakan beberapa usulan persamaan yang sudah ada sebelumnya (Tabel 1). Persamaan tersebut merupakan hasil penelitian dari beberapa varian FRP dan lebih dari sama dengan satu lapis FRP. Persamaan yang diusulkan (Tabel 1) dihitung prediksi peningkatan kekuatan tekan beton (f_{cc}') SCC-RCA-CFRP.

Nilai rasio perbandingan kekuatan tekan SCC-RCA-CFRP (terkekang CFRP) terhadap kekuatan tekan SCC-RCA (tanpa kekangan) (f_{cc}'/f_c') pada Tabel 10 diploting pada Gambar 5, di mana nilai rasio tekanan lateral akibat CFRP terhadap kekuatan tekan SCC-RCA (tanpa kekangan) sama dengan rasio (f_l/f_c') pada Tabel 9. Pada grafik rasio perbandingan kekuatan tekan SCC-RCA-CFRP (variabel Y) terhadap terhadap kekuatan tekan SCC-RCA dan rasio tekanan lateral akibat CFRP (variabel X) terhadap terhadap kekuatan tekan SCC-RCA. Pada Gambar 5 terlihat perbedaan antara beberapa model usulan persamaan sebelumnya pada Tabel 1 terhadap persamaan pendekatan hasil eksperimental. Urutan model persamaan yang mendekati hasil eksperimental disajikan pada Tabel 11.

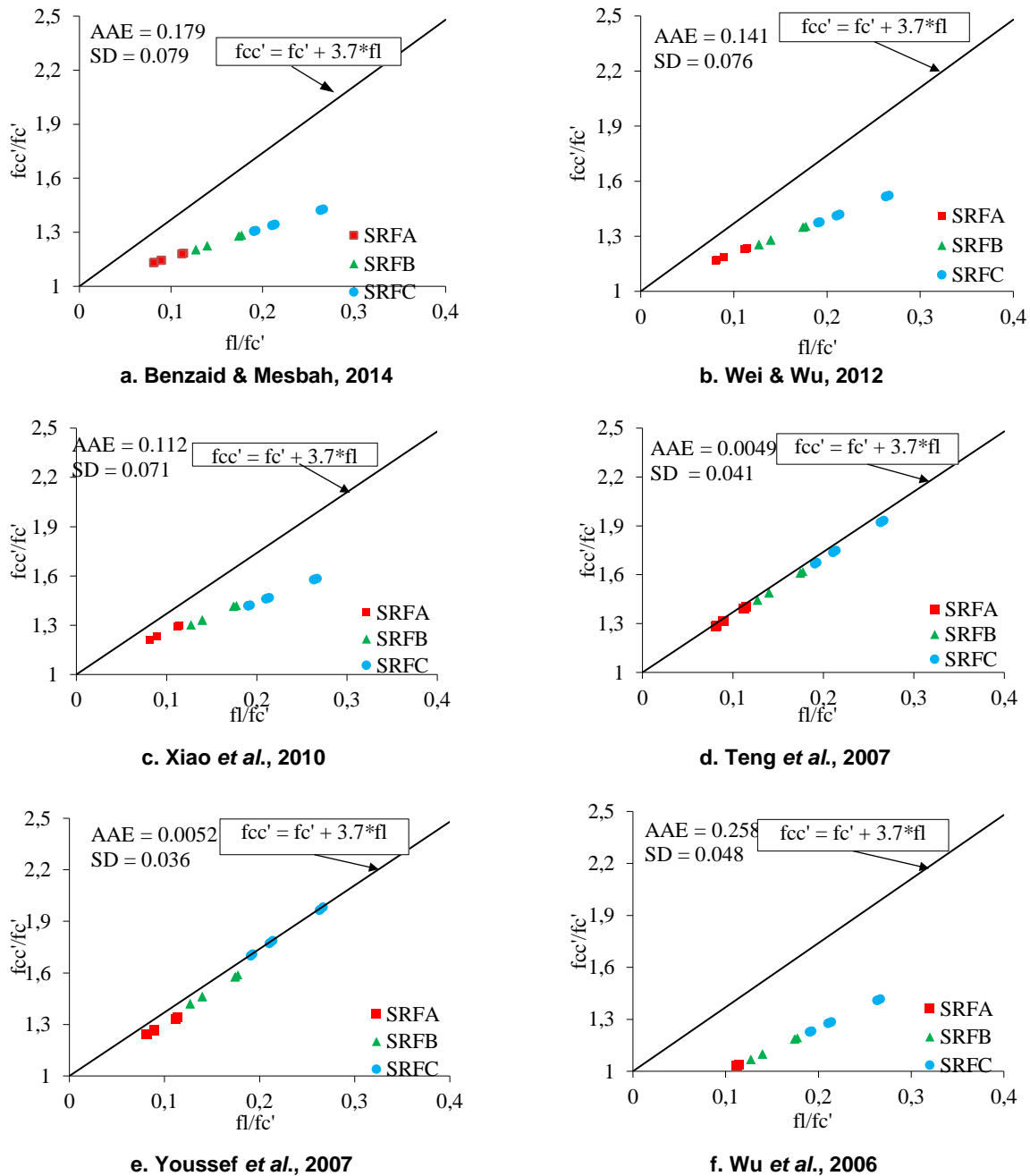
Urutan persamaan yang dapat digunakan berdasarkan hasil perhitungan beberapa model persamaan pada Tabel 11. untuk beton SCC-RCA yang dikekang CFRP satu lapis adalah pertama pendekatan hasil eksperimental (15), kedua yang diusulkan oleh Teng *et al.*, 2007 (1.4) dan ketiga yang diusulkan oleh Youssef *et al.*, 2007 (1.5).

Kesimpulan

Beton SCC-RCA dengan proporsi campuran menggunakan metode ACI 211.1-91 memenuhi syarat dan dapat dilaksanakan. Kekuatan tekan beton SCC-RCA rata-rata umur 28 hari lebih tinggi terhadap kekuatan tekan beton rencana dengan rasio perbandingan sebesar 1,06 sampai dengan 1,21, tetapi untuk nilai modulus elastisitas rata-rata mengalami penurunan rata-rata sebesar 38% sampai dengan 43%, persamaan modulus elastisitas SCC-RCA adalah $E_c = 2500\sqrt{f_c'}$. Perilaku CFRP hasil eksperimental (tegangan-regangan dan modulus elastisitas) kurang dari yang diyaratkan pada *data sheet* produsen dan ACI 440.2R-17. Peningkatan nilai kekuatan tekan yang dihasilkan pada beton yang dikekang CFRP parsial meningkat secara signifikan dengan rasio perbandingan sebesar 1,22 sampai dengan 1,59 untuk terkekang 50% dan 1,23 sampai dengan 1,78 untuk terkekang 75% terhadap beton SCC-RCA tanpa kekangan, tetapi lebih tinggi nilai kekuatan tekan beton yang dikekang CFRP menyeluruh dengan rasio perbandingan sebesar 1,62 sampai dengan 2,22. Dengan demikian luasan kekangan (*volumetric ratio*) dalam perhitungan tekanan lateral CFRP sangat berpengaruh terhadap nilai peningkatan kekuatan tekan beton yang dihasilkan akibat kekangan CFRP. Persamaan peningkatan kekuatan tekan beton SCC-RCA yang dikekang CFRP satu lapis hasil eksperimental adalah $f_{cc}' = f_c' + 3,7f_l$. Persamaan yang diusulkan oleh Teng *et al.*, 2007 dan Youssef *et al.*, 2007 juga dapat digunakan dalam menentukan peningkatan kekuatan tekan beton SCC-RCA yang dikekang satu lapis CFRP.

Tabel 11. Urutan persamaan yang mendekati hasil eksperimental

| No. | Model persamaan f_{cc}' | Persamaan | Gambar | Average | deviasi |
|-----|------------------------------|-----------|--------|----------------|---------|
| | | | | absolute error | standar |
| | | | | AAE | SD |
| 1 | Hasil eksperimental | (14) | 4(a) | 0,000 | 0,000 |
| 2 | Pendekatan eksperimental | (15) | 4(b) | 0,047 | 0,049 |
| 3 | Teng <i>et al.</i> , 2007 | (1.4) | 5(d) | 0,049 | 0,041 |
| 4 | Youssef <i>et al.</i> , 2007 | (1.5) | 5(e) | 0,052 | 0,036 |
| 5 | Xiao <i>et al.</i> , 2010 | (1.3) | 5(c) | 0,112 | 0,071 |
| 6 | Wei & Wu, 2012 | (1.2) | 5(b) | 0,141 | 0,076 |
| 7 | Benzaid & Mesbah, 2014 | (1.1) | 5(a) | 0,179 | 0,079 |
| 8 | Wu <i>et al.</i> , 2006 | (1.6) | 5(f) | 0,258 | 0,048 |



Gambar 5. Grafik perbandingan model persamaan sebelumnya terhadap persamaan pendekatan hasil eksperimental

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ravin Gunawan selaku *National Sales Manager Building System* PT. Sika Indonesia yang telah memberikan bantuan material SikaViscoCrete 3115N, SikaWrap 231C dan Sikadur 330.

Daftar Pustaka

ACI 211.1-91. (1991). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete*. Michigan. USA: ACI.

ACI 440.2R-17. (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures*. Michigan. USA: ACI.

ASTM D3039/D3039M-00. (2000). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. Pennsylvania. USA: ASTM.

Bennenk, W. (2002). SCC. In the dailey precast concrete practice. *betonwerk and fertigteil technik*. michigan. USA: ACI 237R-07.

Benzaid, R., & Mesbah, H. A. (2014). The

- confinement of concrete in compression using CFRP composites-effective design equations. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5), 632–648.
- El-Reddy, M. A. (2009). *Advanced Materials and Techniques for reinforced concrete structures*. Florida. USA: CRC Press.
- Guo, Y. C., Xie, J. H., Xie, Z. H., & Jian Z. (2016). Experimental study on compressive behavior of damaged normal and high-strength concrete confined with CFRP laminates. *Construction and Building Material*, 107, 411-425.
- Lam, L. & Teng, J. G. (2002). Strength model for fiber reinforced plastic confined concrete. *Structure Engineering*, 128(5), 612-623.
- Lam, L., & Teng, J. G. (2003). Design-oriented stress-strain model for frp-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17(6–7), 471–489.
- Nanni, A. & Bradford, N. (1995). FRP jacketed concrete under uniaxial compression. *Construction and Building Material*, 9(2), 115-124.
- Persson, B. (1999). *Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete*. Paper presented at Internasional RILEM Symposim on Self-compacting Concrete (13-14 September 1999). Stockholm.
- Sapeai, M. P., & Tjondro, J. A. (2020). Eksperimental perbandingan kekuatan tekan karakteristik beton self compacting menggunakan agregat kasar alami dan agregat kasar daur ulang. *Politeknologi*, 19(1), 107–120.
- Sonebi, M. & Bartos, P. J. M. (2001). Performance of Reinforced Columns Cast with self compacting concrete. *ACI*, 200, 415-432.
- Tam, V. W. Y., Soomro, M. & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Material*, 172, 272-292.
- Teng, J. G., Huang, Y. L., Lam, L., & Ye, L. P. (2007). Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete. *Journal of Composites for Construction*, 11(2), 201–210.
- EFCA 2005. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete*. UK: EFCA Associations.
- EFNARC 2002. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. EFNARC. UK.
- Tavio, Purwono, R. & Rosyidah, A. (2009). Peningkatan daya dukung dan daktilitas balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP, *Dinamika Teknik Sipil*, 9(1), 9-18.
- Toutanji, H. (1999). Stress-strain characteristic of concrete columns externally confined with advanced fiber composites sheets. *ACI Material Journal*, 96(3), 397-404.
- Wei, Y. Y., & Wu, Y. F. (2012). Unified stress-strain model of concrete for FRP-confined columns. *Construction and Building Materials*, 26(1), 381–392.
- Wu, G., Lu, Z. T., & Wu, Z. S. (2006). Strength and ductility of concrete cylinders confined With FRP Composites. *Construction and Building Materials*, 20(3), 134–148.
- Xiao, Q. G., Teng, J. G., & Yu, T. (2010). Behavior and modeling of confined high-strength concrete. *Journal of Composites for Construction*, 14(3), 249–259.
- Xiao, Y. & Wu, H. (2003). Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets. *Reinforced Plastics and Composites*, 22(13), 1187-1201.
- Youssef, M. N., Feng, M. Q., & Mosallam, A. S. (2007). Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 38(5–6), 614–628.
- Zeng, J. J., Guo, Y. C., Gao, W. Y., Chen, W. P. & Li, L. J. (2018). Stress-strain behavior of concrete in circular concrete columns partially wrapped with FRP strips. *Composite Structures*, 200, 810-828.
- Zhu, W. Z., Gibss, J. C. & Bartos, P. J. M. (2001). Uniformity of in-situ-properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 57-64.