

MODIFIKASI KOEFISIEN DIAGRAM TEGANGAN BETON SERAT PADA BERBAGAI SUHU

Primasiwi Harprastanti^{1,*}, Antonius², Purwanto³, Nor Puji Lestari¹, Baiq Heny Sulistiawati¹, Danang Isnubroto¹

¹Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang

Jl. Prof. H. Soedarto, S.H., Tembalang, Kota Semarang, 50275

²Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung

Jl. Kaligawe Raya RW 4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang

³Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, S.H., Tembalang, Kota Semarang, 50275

*Email : primasiwi.harprastanti@polines.ac.id

Abstract

Fiber concrete is a building material that has been widely introduced in Indonesia. The advantages of fiber concrete are that it can increase the tensile strength of concrete, besides fiber concrete can increase ductility compared to concrete without fibers. In this study, steel wire fibers were used. The weakness of this fiber concrete is against high temperatures. Experiments were carried out with reinforcing fiber concrete at temperatures of 332°C, 621.4°C, and 957.4°C. Fiber concrete that is burned at high temperatures has a significant decrease in strength when it is burned reaching a temperature of 957.4°C. On the stress curve, fiber concrete that is burned at a temperature of 621.4°C has a stress drop of up to 67%. The stress-strain behavior of steel-wire fiber concrete is very ductile when compared to fiber-free concrete. In the concrete stress diagram, the β_1 and k_3 coefficients in fiberless concrete and fiber concrete are not the same. Based on the calculations carried out, the value of k_3 in fiber concrete at various temperatures is taken as $0.92f_c'$, while the value of β_1 in fiber concrete at various temperatures is 0.75.

Kata kunci : fiber, concrete, steel wire, tension diagram

PENDAHULUAN

Beton adalah sebuah bahan bangunan komposit yang terbuat dari komposisi agregat dan pengikat semen. Beton merupakan bahan bangunan yang paling banyak digunakan pada dunia konstruksi. Beton mempunyai banyak kelebihan, diantaranya yaitu bahan dasarnya yang mudah diperoleh sehingga murah biayanya, mudah dibentuk sesuai dengan kebutuhan konstruksi, tahan terhadap suhu tinggi, memiliki kekuatan yang mumpuni,

serta biaya dan pelaksanaan perawatan yang murah dan mudah.

Beton berserat mulai diperkenalkan di Indonesia sejak awal dekade 1990-an. Beton serat didefinisikan sebagai beton yang terbuat dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar dan sejumlah kecil serat/fibre (ACI Committe 544, 1982). Serat dalam beton memiliki fungsi utama yaitu sebagai penopang kekuatan dari beton. Tegangan yang diterima oleh beton akan ditahan oleh serat sampai batas maksimum. Serat

dalam beton juga berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tarik beton sehingga tahan terhadap gaya tarik akibat cuaca, iklim, atau suhu tinggi. Selain itu, beton serat juga dapat mencegah retak-retak sehingga menjadikan beton lebih daktail daripada beton biasa. Ikatan yang kuat antara campuran mempunyai kekuatan retak yang baik (Jansson et al., 2012; Iqbal et al., 2015; Dhinakaran et al., 2016; Janani & Santhi, 2018). Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Suhendro (1991), beton yang diberi serat mempunyai peningkatan daktilitas yang signifikan dibandingkan beton tanpa serat.

Berdasarkan hasil pengujian yang pernah dilakukan, perilaku tegangan-regangan beton serat kawat baja sangat daktail bila dibandingkan dengan beton tanpa serat (Antonius & Setiyawan, 2006). Namun, serat kawat baja mempunyai kelemahan terhadap suhu tinggi. Beton serat kawat baja mempunyai tegangan tekan yang relatif stabil hingga mencapai suhu 600°C, namun setelah itu kekuatan dan kekakuan beton serat kawat baja menurun drastis (Antonius et al., 2014).

Pada diagram tegangan beton, beberapa koefisien pada beton tanpa serat dan beton serat tidak akan sama. Berdasarkan SN 2847-2013, tegangan beton sebesar $0.85f_c'$ dengan regangan beton senilai 0.003. Antonius et al., (2014) menyatakan bahwa regangan beton serat pada *high strength concrete* diasumsikan sekitar 0.004. Regangan maksimum beton serat tidak sama dengan regangan maksimum pada

beton tanpa serat, sehingga perlu kajian mengenai yang mendalam mengenai diagram tegangan pada beton serat.

Pengetahuan mengenai diagram tegangan beton serat pada berbagai menjadi sangat penting karena menjadikan dasar dalam perhitungan momen kapasitas beton. Momen kapasitas ini digunakan dalam perencanaan struktur selanjutnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada beton yang diberi serat pada campurannya. Serat yang digunakan adalah serat kawat bendrat yang terdapat di pasaran dengan rasio panjang terhadap diameter adalah antara 40-50. Berdasarkan SNI 7656-2012, kandungan serat kawat bendrat yang digunakan adalah 0.5% dari volume campuran beton. Desain campuran beton yang digunakan terdiri dari semen (419.98 kg/m³), batu pecah (1044.93 kg/m³), pasir (696.62 kg/m³), *viscocrete* (6.228 l/m³), *fly ash* (74.11 kg/m³), air (160 l/m³).

Benda uji beton serat yang berjumlah 16 buah, dibakar selama waktu yang ditentukan untuk mendapatkan suhu yang diinginkan. Empat buah benda uji dibakar selama 30 menit sehingga mencapai suhu 332.2°C. Empat buah benda uji yang kedua dibakar selama 60 menit sehingga beton mendapat suhu 621.4°C. Empat buah benda uji yang ketiga dibakar selama 90 menit sehingga beton mencapai suhu 957.4°C. Empat buah benda uji yang

terakhir tidak dibakar untuk biarkan pada suhu ruang, yaitu 38.8°C.

Persamaan desain beton pada berbagai suhu telah dikembangkan oleh beberapa peneliti, seperti BS EN (2004), Li Purkiss (2005), Hertz (2005), Kodur et al. (2008), Aslani dan Bastami (2011). Namun, persamaan tersebut hanya dapat digunakan pada beton tanpa serat. Untuk menghitung persamaan tegangan regangan beton serat kawat baja berbagai suhu, maka digunakan persamaan yang diturunkan oleh Antonius et al. (2014). Dalam mendapatkan persamaan tegangan regangan, Antonius et al. (2014) menggunakan material yang sama dengan material yang digunakan pada penelitian ini. Model tegangan regangan beton serat kawat baja pada berbagai suhu untuk *high strength concrete* ($f_c' > 55$ MPa) yang diusulkan oleh Antonius et al. (2014) adalah:

$$f_c' = f_{cT}' \left[\frac{3\varepsilon_c f_{cT}'}{\varepsilon_{cT}' \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cT}'} \right)^3 \right)} \right] \quad (1)$$

Dimana f_c' adalah kuat tekan beton pada suhu normal.

Tegangan puncak untuk beton serat kawat baja pada *high strength concrete* yaitu:

a. $T < 300^\circ$ C, menggunakan persamaan:

$$\frac{f_{cT}'}{f_c'} = 1.0266 - 0.006T \quad (2)$$

b. 300° C \leq T \leq 600° C, menggunakan persamaan:

$$\frac{f_{cT}'}{f_c'} = 1.3503 - 0.016T \quad (3)$$

c. $T \geq 600^\circ$ C, menggunakan persamaan:

$$\frac{f_{cT}'}{f_c'} = 0.5208 - 0.0003T \quad (4)$$

Regangan puncak pada beton serat kawat baja pada berbagai suhu (ε_{cT}') diformulasikan berdasarkan persamaan regresi linier, yaitu sebagai berikut:

a. $T < 300^\circ$ C, menggunakan persamaan:

$$\frac{\varepsilon_{cT}'}{\varepsilon_c'} = 1.0894 - 0.0003T \quad (5)$$

b. 300° C \leq T \leq 600° C, menggunakan persamaan:

$$\frac{\varepsilon_{cT}'}{\varepsilon_c'} = 1.41 - 0.0013T \quad (6)$$

c. $T \geq 600^\circ$ C, menggunakan persamaan:

$$\frac{\varepsilon_{cT}'}{\varepsilon_c'} = 0.79 - 0.0003T \quad (7)$$

Nilai ε_c' untuk *high strength concrete* diasumsikan sekitar 0.004.

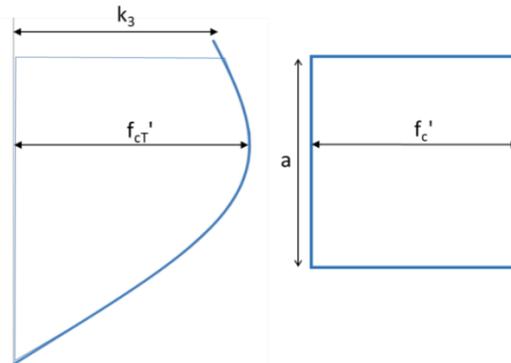
Untuk menentukan nilai k_3 dan β_1 , langkah yang dilakukan adalah:

- Menghitung luas penampang di bawah kurva tegangan beton serat. Kurva tegangan beton serat didapat dari persamaan Antonius et al. (2014).
- Menghitung statis momen kurva tegangan beton serat.
- Menentukan titik berat pada kurva tegangan beton serat.
- Menentukan nilai $\frac{1}{2}a$.

Setelah mendapat nilai a, maka penentuan nilai k_3 dapat dilakukan dengan cara melakukan perbandingan antara kurva tegangan aktual dengan kurva tegangan ekuivalen. Pada Gambar 1, perbandingan dari luas kurva tegangan aktual dan luas kurva tegangan ekuivalen dapat menentukan nilai k_3 yang ingin diketahui.

Berdasarkan Gambar 1, persamaan untuk menentukan nilai k_3 dapat dilihat

pada persamaan 8, 9, dan 10 di bawah.



Gambar 1. Perbandingan luas kurva tegangan aktual dengan luas kurva tegangan ekuivalen

$$= \frac{f_{cT}'}{k_3} \quad (8)$$

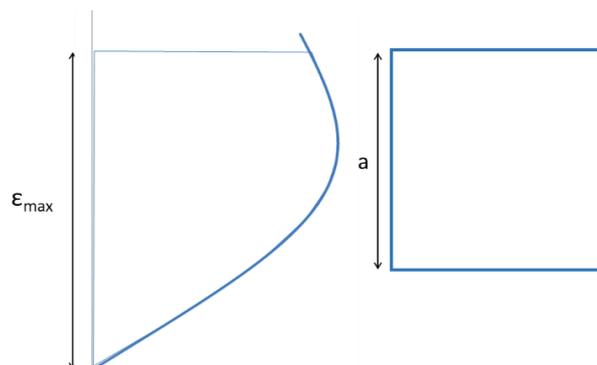
$$\frac{L_A}{a \cdot k_3} = \frac{f_{cT}'}{f_c'} \quad (9)$$

$$k_3 = \frac{L_A \cdot f_c'}{a \cdot f_{cT}'} \quad (10)$$

aktual dengan kurva tegangan ekuivalen. Terlihat pada Gambar 2, perbandingan antara nilai a dan nilai ϵ_{max} dapat digunakan untuk mendapat nilai β_1 . Persamaan untuk menentukan nilai β_1 sebagai berikut:

$$\beta_1 = \frac{a}{\epsilon_{max}} \quad (11)$$

Untuk menentukan nilai β_1 , dilakukan pula perbandingan kurva tegangan



Gambar 2. Perbandingan nilai ϵ_{max} dengan nilai a pada kurva kurva tegangan aktual dan kurva tegangan ekuivalen

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beton serat diuji kuat tekan pada umur 28 hari dengan alat tekan berkapasitas

300 Ton. Pengujian tekan beton serat merupakan nilai kekuatan tekan rata-rata dari benda uji silinder yang

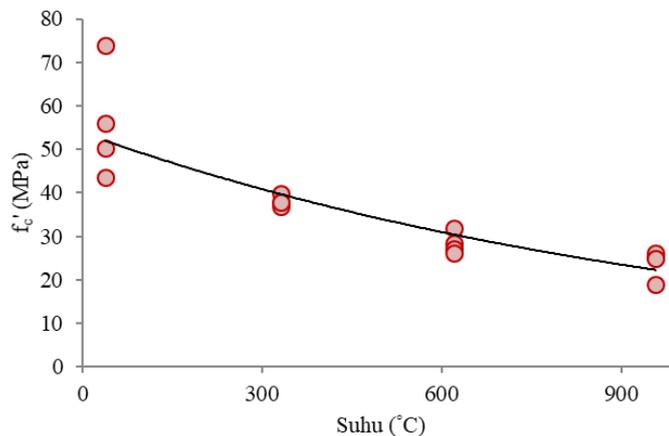
berukuran 150 x 300 mm (ASTM C39-94, 1996). Pengujian kuat tekan beton serat dilakukan setelah beton serat kawat dibakar pada berbagai suhu. Hasil uji tekan beton serat berbagai suhu dapat dilihat pada Tabel 1.

Gambar 1 menunjukkan kuat tekan beton serat mengalami penurunan seiring dengan tingginya suhu yang diterima oleh beton serat. Beton serat yang diberi suhu mencapai 332°C, mengalami penurunan kuat tekan 68% dari kuat tekan pada beton serat suhu ruang. Kuat tekan beton

serat semakin menurun 51% karena dipanaskan hingga mencapai suhu 621.4°C. Apabila beton serat dipanaskan hingga suhu 957.4°C, kuat tekan beton hanya tersisa 43% dari kuat tekan beton suhu ruang. Perhitungan tegangan regangan beton serat berbagai suhu menggunakan persamaan yang diturunkan oleh Antonius et al. (2014). Tegangan puncak dan regangan puncak pada beton serat berbagai suhu dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tekan beton serat berbagai suhu

Suhu (°C)	f_c' (MPa) Sampel 1	f_c' (MPa) Sampel 2	f_c' (MPa) Sampel 3	f_c' (MPa) Sampel 4	f_c' (MPa) Rata-Rata
38.8	73.82	50.30	50.3	50.30	55.9
332.2	39.74	37.90	36.78	37.90	38.08
621.4	31.81	28.53	27.09	26.11	28.38
957.4	25.27	26.11	24.84	18.95	23.79



Gambar 3. Kuat tekan beton serat pada berbagai suhu

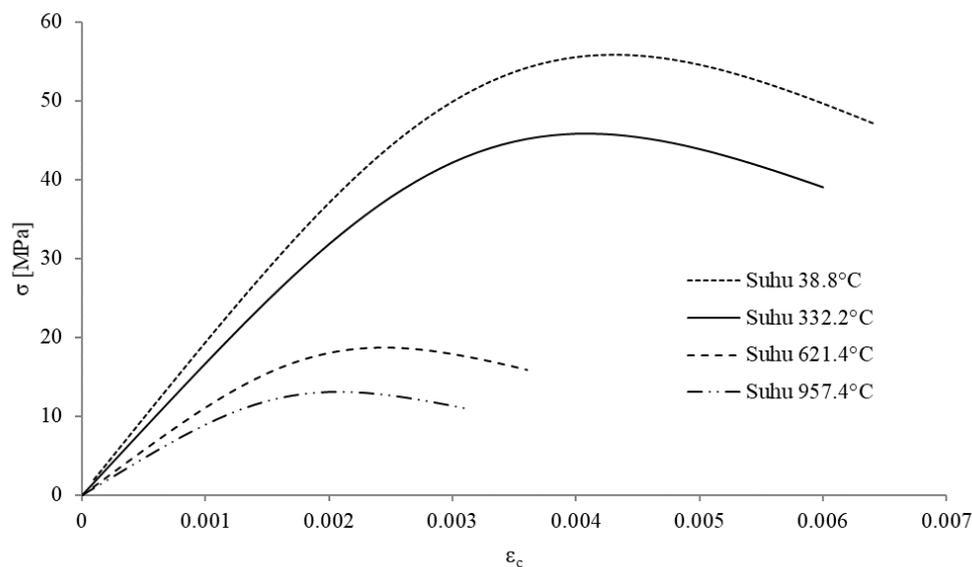
Tabel 2. Tegangan dan regangan puncak beton serat berbagai suhu

Suhu (°C)	f_{cT}'	ϵ_{cT}'
332.2	45,77	0,0039
621.4	18,69	0,0024
957.4	13,06	0,0020

Kurva tegangan regangan beton serat didapat dengan melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan oleh Antonius et al. (2014). Kurva tegangan regangan beton serat berbagai suhu dapat dilihat pada gambar berikut. Dari kurva tegangan regangan tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu yang diterima oleh beton maka beton tersebut akan semakin lemah atau berkurang kekuatannya. Tegangan maksimum terlihat turun setiap kenaikan suhu.

Pada suhu ruang, tegangan maksimum beton serat adalah 55.86

MPa. Pada suhu 332.2°C, tegangan maksimumnya adalah 45.77 MPa, mengalami penurunan sebesar 18% dari tegangan beton serat pada suhu ruang. Ketika beton mendapat suhu 621.4°C, beton mengalami penurunan tegangan yang cukup signifikan yaitu sebesar 67% sehingga tegangan maksimum beton menjadi 18.69 MPa. Apabila beton dipanaskan hingga mencapai suhu 957.4°C, tegangan maksimum semakin menurun menjadi 13.06 MPa. Tegangan maksimum pada suhu ini berkurang 77% dari kekuatan awal.



Gambar 4. Kurva tegangan regangan beton serat berbagai suhu

Berdasarkan kurva tegangan regangan pada Gambar 2, didapatkan nilai β_1 dan k_3 pada beton serat. Nilai β_1 pada beton serat berbagai suhu dapat dilihat pada Tabel 3. Tabel 3 memperlihatkan perbedaan nilai β_1 pada masing-masing perubahan suhu yang diterima oleh beton.

Berdasarkan tabel di atas, β_1 pada beton serat mempunyai nilai yang mendekati angka 0.75.

Tabel 4 menunjukkan perbedaan nilai β_1 pada beton tanpa serat dengan beton serat berdasarkan nilai masing-masing kuat tekan. Seperti yang telah dijelaskan

sebelumnya, nilai β_1 beton serat didapat dengan perhitungan pada kurva tegangan regangan beton serat. Sedangkan nilai β_1 beton tanpa serat menggunakan rumus pada SNI 2847 (2013). Terlihat pada tabel bahwa nilai β_1 beton tanpa serat berbeda-beda sesuai dengan nilai kuat tekan yang dipersyaratkan pada SNI 2847 (2013).

Sedangkan untuk beton serat, nilai β_1 mempunyai nilai sekitar 0.75 dan angkanya lebih rendah dari nilai β_1 beton tanpa serat. Hal ini dikarenakan karena nilai regangan yang dimiliki oleh beton serat lebih besar dibandingkan dengan regangan beton tanpa serat.

Tabel 3. Nilai β_1 pada beton serat berbagai suhu

Suhu ($^{\circ}$ C)	β_1
332.2	0.755
621.4	0.749
957.4	0.756

Tabel 4. Perbandingan nilai β_1 pada beton tanpa serat dan beton serat

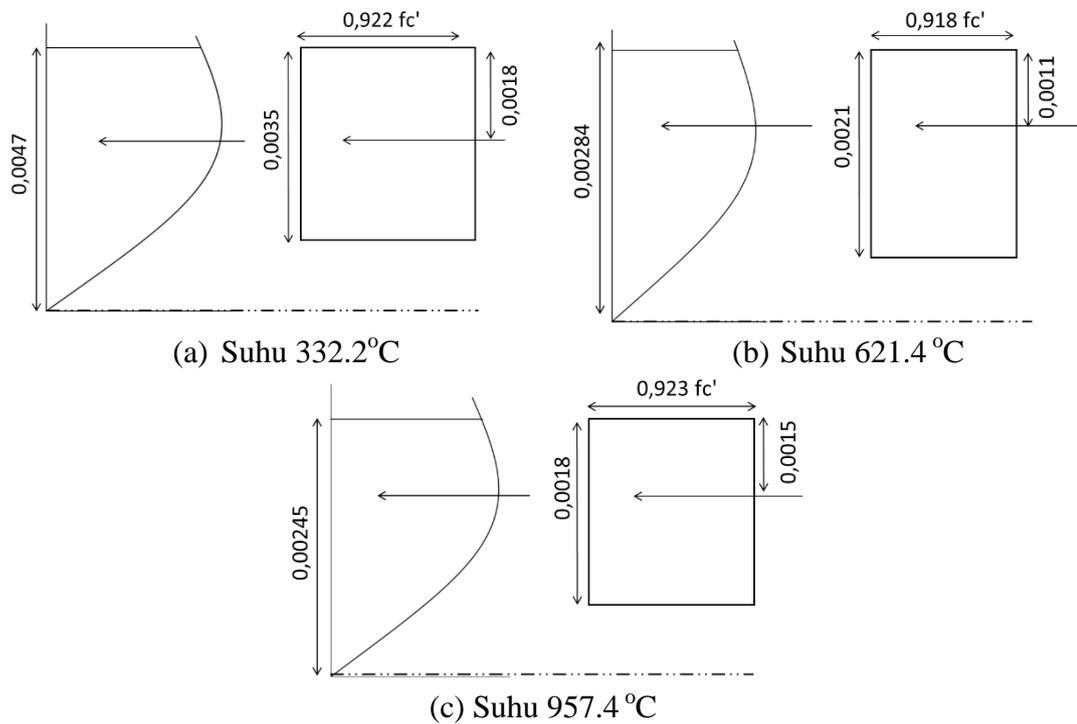
f_c' (MPa)	β_1	
	Beton tanpa serat	Beton serat
38.08	0.778	0.755
28.38	0.847	0.749
23.79	0.85	0.756

Tabel 5. Nilai k_3 pada beton serat kawat baja berbagai suhu

Suhu ($^{\circ}$ C)	k_3
332.2	0.922 f_c'
621.4	0.918 f_c'
957.4	0.922 f_c'

Mengacu Tabel 5, nilai k_3 beton serat berbeda dengan nilai k_3 pada beton tanpa serat. Berdasarkan SNI 2847 (2013), k_3 adalah bernilai $0.85f_c'$. Nilai tersebut digunakan untuk beton yang tidak memiliki serat pada campurannya. Dapat dilihat pada tabel di atas, nilai k_3 pada beton serat berbeda-beda sesuai dengan suhu yang diterima. Apabila dilihat secara garis besar, nilai k_3 pada beton serat berbagai suhu tersebut adalah $0.92f_c'$.

Penggambaran diagram tegangan beton serat dilakukan berdasarkan nilai β_1 dan k_3 yang terdapat pada Tabel 3 dan Tabel 5. Penggambaran tegangan yang dilakukan yaitu pada distribusi tegangan beton yang sebenarnya serta distribusi tegangan beton yang setara. Diagram tegangan regangan pada beton serat berbagai suhu dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 5. Diagram tegangan pada beton serat berbagai suhu

SIMPULAN

Beton serat yang dibakar pada suhu tinggi mengalami penurunan kuat tekan seiring dengan panas yang diterima. Beton yang bakar pada suhu 332.2°C masih mempunyai kekuatan tekan sekitar 68%, sedangkan pembakaran pada suhu 957.4°C menyebabkan beton kehilangan kekuatannya lebih dari 50%. Tegangan maksimum dari beton serat juga mengalami penurunan setiap kenaikan suhu. Tegangan yang paling signifikan penurunannya adalah tegangan pada beton serat yang dibakar pada suhu 621.4°C, yaitu turun sebesar 67% dari kekuatan awal. Nilai β_1 dan k_3 pada beton serat berbagai suhu mempunyai nilai yang berbeda dengan beton tanpa serat. Untuk beton serat berbagai suhu, nilai k_3 dapat diambil nilai $0,92f_c'$. Sedangkan untuk nilai β_1 pada beton

serat berbagai suhu, nilainya adalah 0,75.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Commite 544. May 1982, *State of The Art Report on Fibre Reinforced Concrete*, ACI 544. IR-82, ACI, Detroit, Michigan
- Antonius, Setiyawan, P., 2006, *Kajian besaran mekanis beton berserat mutu tinggi (studi eksperimental)*, Jurnal Wahana Teknik Sipil, Politeknik Neg. Semarang, Vol. 11(3), 74-81.
- Antonius, Widhianto, A., Darmayadi, D., Asfari, G.D., 2014, *Fire Resistance of Normal and High Strength Concrete with Contains of Steel Fibre*, Asian Journal of Civil Engineering vol.15 no. 5, pages 655-669.

- Aslani F., Bastami M., 2011, *Constitutive Relationships for Normal and High Strength Concrete at Elevated Temperature*, ACI Materials Journal, 355-364.
- ASTM C 39 – 94, 1996, *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, Annual Books of ASTM Standards, USA.
- Badan Standarisasi Indonesia, SNI 2847-2013, Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.
- Badan Standarisasi Indonesia, SNI 7656-2012, Tata Cara Pemilihan Campuran Beton Normal, Beton Serat dan Beton Massa.
- British Standard, 2004, *Design of Concrete Structure. Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design*, Commission of European Communities, Brussels, Belgium. 100 p.
- Dhinakaran, G., Vijayarakhavan, S., Kumar, K.R., 2016, *Fracture and Flexural Behavior of High-performance Fiber Reinforced Concrete*, Asian Journal of Civil Engineering, Volume 17(1), pp. 1–14
- Iqbal, S.A., Ali, K., Holschemacher, Bier, T.A., 2015, *Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced High Strength Lightweight Self-Compacting Concrete (SHLSCC)*, Construction and Building Materials, Volume 98, pp. 325–333
- Janani, S., Santhi, A.S., 2018, *Multiple Linear Regression Model for Mechanical Properties and Impact Resistance of Concrete with Fly Ash and Hooked-end Steel Fibers*, International Journal of Technology, Volume 9(3), pp. 526–536
- Jansson, A., Lofgren, I., Lundgren, K., Gyltoft, K., 2012, *Bond of Reinforcement in Selfcompacting Steel-fibre-reinforcement Concrete*, Magazine of Concrete Research, Volume 64(7), pp. 617–630
- Kodur, V.K.R., Dwaikat M.M.S., Dwaikat MB. 2008, *High-Temperature Properties of Concrete for Fire Resistance Modeling of Structure*, ACI Materials Journal. 355-364.
- Li L, Purkiss JA, 2005, *Stress-Strain Constitutive Equations of Concrete Material at Elevated Temperature*, Fire Safety Journal, 669-686.
- Suhendro, B, 1991, Pengaruh Fiber Kawat Lokal Pada Sifat – sifat Beton, Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian UGM, Yogyakarta.