

**LAPORAN PENELITIAN
HIBAH BERSAING PERGURUAN TINGGI
TAHUN ANGGARAN 2012**



**PERILAKU MEKANIK BETON BERSERAT BAJA
PADA SUHU TINGGI**

Tim Peneliti:

- 1. Dr.Ir. Antonius, MT (Ketua)**
- 2. Danna Darmayadi, ST, MT**
- 3. Ir. Gata Dian Asfari, MT**

**Dibiayai oleh Koordinasi Perguruan Tinggi Swasta Wilayah VI,
Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan, Sesuai dengan Surat
Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Nomor:
002/006.2/PP/SP/2012 tanggal 24 Februari 2012**

**UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
NOVEMBER 2012**

**LAPORAN PENELITIAN
PENELITIAN HIBAH BERSAING
TAHUN ANGGARAN 2012**

A. Judul Penelitian : Perilaku Mekanik Beton Berserat Baja Pada Suhu Tinggi

B. Ketua Peneliti

a. Nama Lengkap : Dr.Ir. Antonius, M.T.
b. Jenis Kelamin : Laki-laki
c. Pangkat/Golongan/NIK : Lektor Kepala/IVA/210202033
d. Bidang Keahlian : Material dan Struktur
e. Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Sipil
f. Perguruan Tinggi : Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)-
Semarang

C. Anggota Peneliti

Nama	Bidang Keahlian	Fakultas/Jurusan	Perguruan Tinggi
1. Danna Darmayadi, ST, M.T.	Struktur	FT.-Teknik Sipil	UNISSULA
2. Ir. Gata Dian Asfari, M.T.	Material	FT.- Teknik Sipil	UNISSULA

D. Dana Penelitian


Dari Dikti : Rp.42.500.000,-

Semarang, November 2012

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik,


Dr. Ir. Kartono Wibowo, MM, MT
NIK. 210291015

Ketua Peneliti,


Dr. Ir. Antonius, MT.
NIK. 210202033


Menyetujui
Ketua Lembaga Penelitian


Dr. Budhi Cahyono, SE, MSi
NIK. 210492030

RINGKASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku mekanik beton berserat baja paska bakar seperti kuat tekan, kuat tarik, modulus lentur, modulus elastisitas dan nilai nisbah Poisson. Parameter pengujian yang ditinjau adalah kuat tekan beton ($30 \text{ MPa} < f_c' < 75 \text{ MPa}$) dan suhu pembakaran yaitu 300°C , 600°C dan 900°C . Program eksperimen dilakukan dari mulai pemilihan material beton seperti semen, krikil, pasir dan bahan tambah seperti Abu Terbang (*Fly Ash*) untuk beton mutu tinggi. Serat baja yang digunakan berupa Kawat Baja dengan kandungan 0.5% dari volume beton, yang mempunyai panjang maksimum 5 cm sesuai ketentuan standar yang berlaku. Di dalam penelitian ini, sebagai perbandingan dibuat pula benda uji beton berserat karung goni. Untuk menambah sifat kelecakan beton ditambahkan Viscocrete dengan kandungan 1,5 hingga 2%. Untuk pengujian kuat tekan beton, kuat tarik dan modulus elastisitas dibuat benda uji beton silinder ukuran 150/300 mm, sedangkan untuk pengujian modulus lentur menggunakan balok prisma ukuran 15x15x60 cm. Pembakaran benda uji beton sampai suhu tinggi (900°C). Untuk menyesuaikan kapasitas alat uji tekan, beberapa benda uji beton mutu tinggi menggunakan silinder 100/200 mm. Total benda uji yang dibuat adalah sebanyak 248 buah, baik benda uji Kontrol (Tanpa dibakar dan yang dibakar). Hasil pengecoran menunjukkan bahwa sifat workabilitas beton berserat baja maupun beton berserat karung goni berdasarkan nilai slump masih dapat terjaga dengan baik dengan cara menambahkan Viscocrete sebesar 0,5%. Pembakaran benda uji dilaksanakan setelah beton mencapai umur 120 hari. Hasil eksperimen terhadap perilaku mekanik menunjukkan bahwa penurunan Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja terhadap spesimen Kontrol apabila dibakar pada suhu 300°C belum signifikan, namun apabila dibakar pada suhu 600°C dan 900°C akan terjadi kehilangan kuat tekan sekitar 60% hingga 75%. Perilaku Kuat tarik (f_t), modulus lentur (f_r), modulus elastisitas (E_c) dan nilai nisbah Poisson (ν) beton Serat Kawat baja paska bakar juga sebanding dengan perilaku kuat tekannya. Perilaku tegangan-regangan beton Serat Kawat Baja diperoleh dengan melakukan uji tekan menggunakan Sistem pengujian Strain Control. Berdasarkan perilaku tersebut, sifat Daktilitas beton Serat Kawat Baja paska bakar pada suhu normal dan suhu 300°C relatif tidak berkurang secara berarti baik untuk beton mutu normal, menengah maupun mutu tinggi. Namun pada suhu 600°C dan 900°C seiring dengan kehilangan kekuatan tekan yang sangat signifikan juga mempengaruhi penurunan daktilitas yang memadai. Perbandingan penurunan Kuat Tekan Beton Serat Karung Goni apabila dibakar pada suhu 300°C , 600°C dan 900°C lebih cepat bila dibandingkan sifatnya dengan Beton Serat Kawat Baja.

KATA PENGANTAR

Laporan Penelitian Hibah Bersaing Tahun Anggaran 2012 ini merupakan penelitian yang telah dilakukan pada tahun pertama dari dua tahun penelitian yang direncanakan dan dibiayai oleh Koordinasi Perguruan Tinggi Swasta Wilayah VI, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Nomor: 002/006.2/PP/SP/2012 tanggal 24 Februari 2012. Laporan ini menyajikan penyelidikan secara eksperimental terhadap perilaku mekanik material beton Berserat yang dibakar pada suhu tinggi, dengan meninjau parameter pengujian yaitu kuat tekan beton dan suhu.

Dengan telah selesainya laporan ini, kami menyampaikan terima kasih kepada:

1. Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
2. Koordinasi Perguruan Tinggi Swasta Wilayah VI, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan
3. Ketua Lembaga Penelitian Universitas Islam Sultan Agung.
4. Pimpinan dan seluruh staf Laboratorium Bahan Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung.
5. Pimpinan dan Staf Krematorium Kedungmundu Semarang, yang menyediakan tempat untuk pembakaran benda uji.
6. Pimpinan dan seluruh staf Laboratorium Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Diponegoro.

Semoga hasil penelitian ini dapat memperkaya khasanah Ilmu Pengetahuan dan memberi kontribusi yang signifikan bagi industri konstruksi khususnya di Indonesia.

Semarang, November 2012

Tim Peneliti

Antonius
Danna Darmayadi
Gata Dian Asfari

DAFTAR ISI

		Hal.
BAB I	PENDAHULUAN	
	1.1. Latar belakang	1
	1.2. Tujuan Penelitian	2
BAB II	STUDI PUSTAKA	3
	2.1. Beton Berserat Baja	3
	2.2. Jenis-jenis Serat	4
	2.3. Perilaku mekanik Beton Berserat	5
	2.4. Perilaku Tegangan-regangan Beton berserat	7
	2.5. Perilaku Beton Tahan Api	7
	2.6. Sifat termal Agregat	10
	2.7. Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton pada Temperatur Tinggi dan Ketahanannya Terhadap Api	11
	2.7.1. Kuat tekan beton pada temperatur tinggi	11
	2.7.2. Modulus elastisitas pada temperatur tinggi	12
BAB III	METODE PENELITIAN	
	3.1. Program Eksperimental	13
	3.1.1. Parameter pengujian	13
	3.1.2. Material	13
	3.1.3. Spesifikasi benda uji	14
	3.1.4. Desain campuran beton	14
	3.1.5. Pengujian	14
	3.2. Ruang Pembakaran	15
	3.3. Penataan benda Uji	16
	3.4. Mekanisme Kerja Alat Pembakar Beton	16
	3.5. Bagan Alir Penelitian	17
BAB IV	HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN	18
	4.1. Pembuatan Benda Uji	18
	4.2. Beton Serat Kawat Baja	18
	4.2.1. Kuat tekan	18
	4.2.2. Kuat tarik	20
	4.2.3. Modulus lentur	22
	4.2.4. Modulus elastisitas	24
	4.2.5. Poisson ratio	26
	4.2.6. Perilaku tegangan-regangan	28
	4.2.6.1. Pengaruh perubahan suhu	28
	4.2.6.2. Pengaruh kuat tekan beton dengan suhu tetap	30
	4.3. Beton Serat Karung Goni	32
	4.4. Perbandingan Beton Serat Kawat Baja dengan Serat Karung Goni	33
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	35
	5.1. Kesimpulan	35
	5.2. Saran	35

DAFTAR PUSTAKA

36

LAMPIRAN I KURVA HASIL PENGUJIAN

LAMPIRAN II DOKUMENTASI

LAMPIRAN III ARTIKEL ILMIAH

DAFTAR GAMBAR

		Hal.
Gambar	3.1. Tampak depan ruang pembakaran	15
	3.2. Bentuk penataan benda uji	16
	3.3. Mekanisme pembakaran benda uji	16
	3.4. Bagan alir penelitian	17
	4.1. Hubungan kuat tekan normalisasi terhadap perubahan suhu	19
	4.2. Regresi hubungan kuat tekan normalisasi terhadap perubahan suhu	20
	4.3. Kuat tarik beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.4$ MPa	21
	4.4. Kuat tarik beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.1$ MPa	21
	4.5. Kuat tarik beton dengan variasi suhu; $f'_c=72.5$ MPa	22
	4.6. Kuat lentur beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.4$ MPa	23
	4.7. Kuat lentur beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.1$ MPa	23
	4.8. Kuat lentur beton dengan variasi suhu; $f'_c=73.5$ MPa	24
	4.9. Modulus elastisitas beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.4$ MPa	25
	4.10. Modulus elastisitas beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.4$ MPa	25
	4.11. Modulus elastisitas beton dengan variasi suhu; $f'_c=72.5$ MPa	26
	4.12. Poisson ratio beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.9$ MPa	27
	4.13. Poisson ratio beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.4$ MPa	27
	4.14. Poisson ratio beton dengan variasi suhu; $f'_c=72.5$ MPa	28
	4.15. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.9$ MPa	29
	4.15. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.4$ MPa	29
	4.17. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi suhu; $f'_c=73.5$ MPa	30
	4.18. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi f'_c ; suhu 300°C	30
	4.19. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi f'_c ; suhu 600°C	31
	4.20. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi f'_c ; suhu 900°C	31
	4.21. Perubahan kuat tekan beton Serat Karung Goni terhadap Suhu	33
	4.22. Perbandingan perubahan kuat tekan beton Berserat terhadap Suhu; $f'_c\sim 30$ MPa	33
	4.23. Perbandingan perubahan kuat tekan beton Berserat terhadap Suhu; $f'_c\sim 50$ MPa	34
	4.24. Perbandingan perubahan kuat tekan beton Berserat terhadap Suhu; $f'_c\sim 75$ MPa	34

DAFTAR TABEL

	Hal.
Tabel 2.1. Proporsi campuran beton berserat Baja berat normal	3
2.2. Perilaku fisik beberapa jenis serat	5
3.1. Rencana jumlah benda uji beton $f'_c \sim 30$ MPa	14
3.2. Rencana jumlah benda uji beton $f'_c \sim 50$ MPa	14
3.3. Rencana jumlah benda uji beton $f'_c \sim 70$ MPa	14
4.1. Hasil uji kuat tekan beton serat Kawat Baja	18
4.2. Hasil uji kuat tarik beton serat Kawat Baja	20
4.3. Hasil uji modulus lentur beton serat Kawat Baja	22
4.4. Hasil uji modulus elastisitas beton serat Kawat Baja	24
4.5. Hasil uji Poisson ratio beton serat Kawat Baja	26
4.6. Hasil uji tekan beton serat karung Goni	32

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sejak awal dekade 1990-an di Indonesia telah mulai diperkenalkan beton berserat dimana dari hasil penelitian yang telah dilakukan material tersebut mempunyai peningkatan daktilitas yang signifikan dibandingkan beton tanpa serat sehingga penggunaan material beton berserat ini mempunyai prospek sangat baik karena sangat cocok digunakan di Indonesia yang merupakan daerah rawan gempa. Penggunaan serat pada beton sangat mudah diperoleh dan dilaksanakan. Salah satu serat yang sering digunakan adalah serat yang terbuat dari baja, yaitu kawat bendrat. Dengan berkembangnya pengetahuan perilaku mekanik beton berserat baja dari beton mutu normal sampai mutu tinggi, maka timbul pertanyaan mengenai sifat thermal beton berserat baja tersebut, karena seperti diketahui baja karena dari bahan pembentuknya dapat mengalami penurunan kekuatan dan kekakuan yang signifikan pada suhu tinggi dan dalam waktu yang relatif pendek.

Di lain pihak, dalam beberapa tahun terakhir ini bangunan sipil sering mengalami kebakaran karena berbagai sebab, baik itu karena hubungan pendek arus listrik, ledakan kompor/tabung gas, ledakan bom, sambaran petir, atau karena kerusakan-kerusakan yang dengan sengaja membakar gedung-gedung yang tidak bersalah. Setiap kebakaran yang terjadi mengakibatkan kerusakan yang berbeda-beda, oleh karena itu perbaikannya pun bisa tidak sama. Apabila kebakaran yang terjadi cukup lama maka dimungkinkan bisa mencapai suhu 900°C atau bahkan lebih.

Material beton relatif lebih tahan terhadap temperatur tinggi akibat kebakaran dibandingkan struktur baja ataupun kayu yang tidak diproteksi secara khusus. Salah satu kelebihan struktur beton terlihat pada saat mengalami kebakaran adalah keruntuhannya tidak terjadi secara tiba-tiba. Bila dalam tahap pembangunan suatu bangunan sipil ditemukan kecurigaan bahwa mutu betonnya kemungkinan tidak memenuhi persyaratan paska kebakaran (perubahan temperatur yang ekstrem), maka perlu dilakukan pemeriksaan untuk mengetahui tingkat degradasi mutu betonnya. Semua kegiatan pemeriksaan mutu beton terutama kuat tekannya adalah untuk mendukung proses diagnosis dan evaluasi guna menentukan tingkat kelayakan struktur yang sudah terbakar. Beton yang dulunya elastis dan dapat menahan beban kerja, setelah terkena

panas akibat kebakaran sifat elastisnya menjadi berkurang drastis, sehingga lenturan dan lendutannya pun menjadi besar.

Berdasarkan uraian permasalahan di atas maka sangat perlu dilakukan penelitian beton berserat baja pada suhu tinggi agar diperoleh informasi yang mendalam sifat-sifatnya apabila telah mengalami kebakaran. Selain itu dengan diketahuinya perilaku beton berserat baja paska bakar akan dapat dipastikan tingkat kelayakan penggunaan struktur yang telah mengalami kebakaran.

1.2. Tujuan Penelitian

Pengetahuan perilaku mekanik beton paska bakar pada suhu tinggi menjadi sangat penting karena akan menentukan tingkat kelayakan penggunaan struktur paska kebakaran. Pengujian beton berserat baja pada suhu tinggi (900°C) di Indonesia relatif masih sangat terbatas. Dengan dilakukannya penelitian ini terbuka kemungkinan pengembangan ilmu material dan teknologi beton, khususnya beton paska bakar.

BAB II STUDI PUSTAKA

2.1. Beton Berserat Baja

Beton bertulang berserat baja adalah sebuah material komposit yang tersusun dari semen hidraulis, agregat halus dan kasar dan sebaran dari sebagian serat-serat baja (steel fiber). ACI Committee 544 menentukan ukuran serat baja yg bervariasi dari 12,7 mm hingga 63,5 mm. Diameter serat baja yang sering digunakan adalah dari ukuran 0,45 mm sampai 1 mm. Dewasa ini telah berkembang bentuk-bentuk serat baja yaitu melingkar, oval, persegi yang kesemuanya dibentuk tergantung dari proses peruntukan beton tersebut dan ketersediaan bahan di pasaran. Kandungan serat baja dalam beton secara umum berada dalam kisaran 0,25% hingga 2% dari volume beton. Dilaporkan pula bahwa penambahan serat baja dapat meningkatkan beberapa sifat-sifat beton secara signifikan seperti kekuatan kejut (impact) dan toughness (penyerapan energi). Demikian pula dengan sifat-sifat lain seperti kekuatan lentur, kekuatan fatigue, dan kemampuan menahan retak yang lebih baik pada beton berserat baja.

Sejumlah hasil penelitian telah dipublikasikan yang berkaitan dengan beton berserat pada elemen struktur beton bertulang. Hasil-hasil penelitian tersebut pada umumnya menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kekuatan lentur, ketahanan terhadap geser maupun sifat fatigue yang lebih baik. Salah satu keuntungan penggunaan beton berserat baja adalah dapat mereduksi ukuran penampang. Aplikasi material ini sangat luas seperti penggunaannya pada struktur bangunan air yaitu, dam, spillway, stilling basin dan lain-lain. Lebih lanjut ACI Committee 544 merekomendasikan batasan rencana campuran beton berserat seperti terlihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. proporsi campuran beton berserat baja berat normal

	Ukuran agregat max. ¼ in	Ukuran agregat max. ¾ in	Ukuran agregat max. 1 1/2 in
Semen, lb/yd ³	600-1000	500-900	470-700
w/c, lb/lb	0,35-0,45	0,35-0,50	0,35-0,55
Prosentase pasir terhadap krikil	45-60	45-55	40-55
Kandungan udara	4-8	4-6	4-5
Serat deformed	0,4-1	0,3-0,8	0,2-0,7
Serat undeformed	0,8-2,0	0,6-1,6	0,4-1,4

Catatan: 1 lb/yd³=0,5933 kg/m³; 1serat baja dalam prosentase volume=132,3 lb/yd³ (78,5 kg/m³)

2.2. Jenis-jenis Serat

Penambahan steel fiber secara signifikan dapat meningkatkan sifat-sifat mekanik dari mortar dan beton seperti kekuatan kejut (impact) dan kekerasan (toughness). Selain itu dengan penambahan steel fiber juga dapat meningkatkan kekuatan lentur, fatigue dan kemampuan untuk mengurangi retak (crack). Ide dasar penambahan serat adalah memberikan tulangan pada beton dengan serat yang disebarkan secara merata untuk mencegah retak-retak yang terjadi akibat pembebanan.

Secara umum penambahan steel fiber dalam adukan beton tidak meningkatkan kuat tekan secara signifikan dibandingkan beton tanpa fiber, namun dapat meningkatkan tegangan tekan pada saat beban ultimit.

Terdapat beberapa jenis bahan serat yang dicampur ke dalam adukan beton, yaitu:

a) Serat Baja (*Steel Fibers*)

Serat baja mempunyai kekuatan serta modulus elastisitas yang cukup tinggi. Disamping itu serat baja tidak mengalami perubahan bentuk terhadap pengaruh alkali dalam semen. Pembebanan dalam jangka waktu yang panjang tidak berpengaruh terhadap sifat mekanik baja. Kelemahan yang dimiliki adalah jika serat baja tidak dalam posisi yang terlindung dalam beton, maka resiko terjadinya korosi dapat timbul. Sifat adhesi yang tinggi dari serat baja juga akan mengakibatkan terjadinya balling effect, yaitu serat tidak tersebar merata pada saat diacampur tetapi menggumpal menjadi suatu bola-bola serat.

b) Serat Polypropelene

Serat ini merupakan jenis dari serat plastik (plastic fibers). Sifat polypropelene adalah tidak menyerap air semen, modulus elastisitas yang rendah, ikatan dalam semen kurang baik, mudah terbakar, kurang tahan lama, serta titik lelehnya rendah. Serat plastik yang lain adalah serat nylon (nylon fibers). Serat ini juga mempunyai sifat-sifat yang sama dengan sifat polypropelene.

c) Serat Kaca (*Glass Fibers*)

Dalam hal kekuatan, serat kaca hampir menyamai serat baja tetapi berat jenisnya rendah dan modulus elastisitasnya hanya sepertiga dari serat baja. Kekurangan yang paling pokok dari serat kaca adalah kurang tahan terhadap pengaruh alkali dalam kerusakan pada seratnya.

d) Serat Karbon (*Carbon Fibers*)

Merupakan jenis serat yang paling mahal. Serat ini dapat dipakai untuk meningkatkan kekuatan dalam menahan retak serta kuat batas mortar. Meskipun demikian kelemahan serat karbon dalam hal keliatan memerlukan pertimbangan khusus dalam pemakaiannya.

e) Serat Asbestos (*Asbeston Fibers*)

Serat ini tergolong serat murah dan sangat baik apabila dikombinasikan dengan pasta semen yang sering disebut dengan asbestos semen. Karena tahan terhadap panas, asbestos ini baik digunakan untuk asbes lembaran, pipa dan genteng.

f) Serat dari tumbuh-tumbuhan

Yang tergolong serat ini adalah serat ijuk, kapas dan bambu. Biasanya dipakai untuk keperluan non-struktur, karena serat ini tidak tahan lama.

g) Serat Kevlar (*Cevlar fibers*)

Serat ini merupakan serat yang terbuat dari polimer beraroma, yang memiliki nilai modulus elastisitas dan kuat tarik yang cukup tinggi. Serat ini harganya relatif mahal.

Tabel 2.2 memperlihatkan perilaku fisik berbagai jenis serat.

Tabel 2.2. Perilaku fisik beberapa jenis serat

Jenis Serat	Kuat tarik (N/mm ²)	Modulus Young (N/mm ²)	Perpanjangan (%)	Berat jenis
Acrylic	210-420	2,1.10 ³	25-45	1,10
Asbestos	560-985	8,4-14	0,6	3,20
Cotton	420-700	5	3-10	1,50
Glass	1050-3870	70	1,5-3,5	2,50
Nylon	780-850	4,2	16-20	1,10
Polyster	750-880	8,5	11-13	1,40
Polypropelene	560-780	3,5	25	0,90
Rayon	420-630	7,3	10-25	1,50
Steel	280-420	20.10 ⁴	0,5-25	7,80

2.3. Perilaku Mekanik Beton Berserat

Secara struktural beton mempunyai kuat tekan yang tinggi, tetapi kuat tariknya sangat rendah dan sifatnya getas (*brittle*). Pada kondisi yang demikian, elemen struktur yang betonnya mengalami tegangan tarik diperkuat dengan batang baja tulangan tarik, sehingga terbentuk suatu struktur yang komposit. Dalam perancangan struktur, tegangan tarik beton tidak diperhitungkan dan beton dianggap hanya mampu menahan tegangan desak. Pada struktur yang didominasi oleh

tarik dan lentur yang lebih besar (balok misalnya), bagian tarik beton akan segera retak bila mendapat tegangan yang tidak begitu besar. Secara struktural kondisi ini tidak membahayakan karena tegangan tarik telah didukung sepenuhnya oleh tulangan. Namun akibat retak, berarti terjadi kontak antara tulangan dengan oksigen yang akan menyebabkan korosi sehingga luas tampang tulangan menjadi berkurang dan akibatnya daya dukung beton menjadi berkurang pula.

Untuk memperbaiki sifat kurang baik beton ditambahkan berbagai bahan tambah, baik yang bersifat kimiawi maupun fisikal pada adukan beton. Salah satu alternatif bahan tambah yang bersifat fisis adalah serat baja (*steel fibers*). Ide dasarnya adalah menulangi beton dengan serat baja yang disebarkan secara merata ke dalam adukan beton dengan orientasi random, sehingga dapat mencegah terjadinya retakan-retakan beton terlalu dini akibat pembebanan maupun panas hidrasi (Soroushian dan Bayasi, 1987). Keadaan ini menyebabkan kemampuan beton untuk mendukung tegangan-tegangan dalam (aksial, lentur dan geser) yang terjadi akan meningkat. Pemberian serat baja lokal produksi dalam negeri dengan bentuk lurus berdiameter 1 mm berhasil menambah kekuatan tarik dan lentur, daktilitas, dan kuat desak beton (Suhendro, 1991).

Kuat tarik beton dipengaruhi oleh bentuk fiber yang digunakan, aspek rasio dan jumlah fiber. Fiber dengan kait (*hooked fiber*) dapat menambah kuat tarik beton bila dibandingkan dengan fiber lurus (ACI Committee 544, 1988). Fiber dengan kait juga lebih efektif dibandingkan dengan fiber lurus dalam hal lenturan dan tekanan pada perilaku beton (Soroushian dan Bayasi, 1991).

Penambahan *steel fibers* dengan orientasi random akan meningkatkan kuat lentur beton fiber dibandingkan dengan beton tanpa fiber. Sifat getas beton dapat diatasi oleh fiber sehingga beton fiber menjadi liat (Soroushian and Bayashi, 1992). Selain itu fiber pada beton akan menambah kekuatan dan mengurangi lendutan (Mansur et al., 1997). Di lain pihak, Balaguru & Ramakrishnan (1986) menjelaskan bahwa peningkatan kekuatan tekan beton berserat selalu akan diikuti dengan lebih getasnya mode keruntuhan.

2.4. Perilaku Tegangan-regangan Beton Berserat

Beton berserat (fiber) dengan mutu normal mempunyai perilaku yang daktail, dimana beton fiber dapat berdeformasi secara signifikan tanpa kehilangan kekuatan yang berarti. Ezeldin & Balagou (1992) mengusulkan persamaan tegangan-regangan beton berserat mutu normal sebagai berikut:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)}{(\beta - 1) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)^\beta} \quad (2.1)$$

dimana:

$$\varepsilon_o = 0,002 + 0,5 \times 10^{-6} \cdot R \leq 0,003 \quad (2.2)$$

$$R = \frac{V_f \cdot l}{\phi} \quad (2.3)$$

$$\beta = 1,09 + 0,71(R)^{-0,93} \quad (2.4)$$

khusus untuk fiber berbentuk hooked:

$$\beta = 1,09 + 7,5(R)^{-1,39} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.2) di atas menunjukkan bahwa beton fiber mempunyai sifat yang lebih daktail. Untuk beton berserat yang mempunyai mutu tinggi ($f'_c > 50$ MPa) persamaan (2.1) perlu diverifikasi akurasinya, baik dalam hal kekuatan maupun daktilitasnya.

2.5. Perilaku Beton Terhadap Api

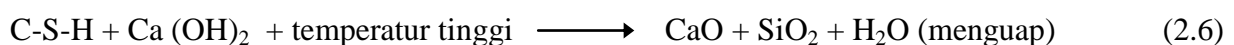
Tujuan digunakannya selimut beton (*cover concrete*) dalam struktur beton bertulang adalah untuk melindungi tulangan dari infiltrasi ion-ion klorida agar tidak terjadi korosi, dan yang kedua adalah untuk memperlambat panas yang masuk ke tulangan apabila terjadi kebakaran. Berdasarkan tujuan tersebut estimasi terhadap tebal selimut beton yang digunakan sangat penting dilakukan. Oleh karena itu perlu dipelajari mengenai sifat-sifat beton yang terbakar, termasuk diantaranya adalah lama dan suhu kebakaran.

Beton merupakan material bangunan yang memiliki tahanan terhadap api/panas yang unggul dibandingkan jenis material lain, seperti kayu atau baja. Hal ini disebabkan karena beton merupakan penghantar panas yang lemah (*low thermal conductivity*), sehingga dapat membatasi kedalaman penetrasi panas. Selain keunggulan tersebut beton juga relatif mudah untuk diperbaiki. Oleh karena itu perlu adanya rekayasa forensik untuk mengetahui dan mempelajari mekanisme penyebab terjadinya suatu kegagalan struktur. Melalui pelajaran yang dapat diambil dari kejadian tersebut, juga dimanfaatkan sebagai informasi yang berharga untuk pengambilan keputusan di masa mendatang [Gustafero,1985 dan Priyosulistiyo,2004].

Kemungkinan terjadinya kebakaran hampir pada seluruh struktur beton selalu ada, tetapi bila setiap struktur beton diperhitungkan untuk kebakaran besar merupakan suatu hal yang berlebihan. Peraturan penutup beton pada tulangan sudah cukup menahan keruntuhan struktur yang terbakar. Dalam hal terjadinya kebakaran akan timbul perbedaan temperatur yang besar pada struktur. Mula-mulanya bagian permukaan amat panas dan akan memuai. Semakin masuk ke dalam beton, semakin kurang pemanasan dan pemuaiannya akan terhalang. Pada saat kebakaran dipadamkan, permukaan luar cepat mendingin akibat semprotan air.

Baker (1996) menjelaskan bahwa kebakaran pada hakekatnya merupakan reaksi kimia dari material yang mudah terbakar dengan oksigen yang dikenal dengan reaksi pembakaran dan menghasilkan panas. Beton jika terkena panas baik langsung (dibakar) ataupun tidak langsung (perambatan secara radiasi, ataupun konduksi) maka akan terjadi reaksi kimia. Reaksi ini tergantung pada suhu yang diterima oleh beton, yang pada akhirnya berpengaruh pada kekuatan beton.

Beton terdiri dari semen portland (semen), air dan agregat. Keberadaan air menyebabkan proses hidrasi. Reaksi kimia antara air (H_2O) dan semen (khususnya C_3S , C_2S), menghasilkan senyawa baru yang disebut kalsium silikat hidrat ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ atau C-S-H) yang berbentuk kristal keras dan kuat, disamping senyawa kalsium hidroksida $\{Ca(OH)_2\}$. Mekanisme penurunan kekuatan beton akibat pemanasan suhu tinggi dapat diuraikan (dekomposisi) sebagai berikut, diawali oleh proses dehidrasi, yaitu C-S-H dan $Ca(OH)_2$ menjadi senyawa pembentuknya yaitu oksida kalsium (CaO) dan silikat (SiO_2). Keduanya berwarna keputihan. Selain dari pada itu pada suhu $573^\circ C$ terjadi transformasi silikat, yaitu mineral yang terkandung dalam agregat. Transformasi silikat ini akan menyebabkan meningkatnya intensitas retak di zona transisi akibat perbedaan dilatasi termal antara agregat dan pasta semen. Diatas suhu $700^\circ C$ penurunan kekuatan beton sudah tidak signifikan lagi, karena reaksi dekomposisi dalam beton sudah berakhir. Struktur internal beton sudah rusak, antara agregat dan pasta semen sudah tidak ada ikatan lagi.



Temperatur tinggi akibat kebakaran berpengaruh pada kekuatan dan kekakuan dari berbagai elemen struktur beton bertulang, seperti kolom, balok maupun pelat lantai. Kapasitas struktur beton bertulang setelah kebakaran dipengaruhi oleh berbagai hal seperti temperatur tinggi yang

pernah dialami, lama kebakaran, jenis dan perilaku pembebanan, jenis dan ukuran agregat, faktor air semen dan bentuk penampang kolom. Menurut Sidibe (2000) pada temperatur antara 100°C s/d 300°C, beton normal menunjukkan peningkatan kekuatan sekitar 9 % sampai 14% diatas kekuatan temperatur ruang. Kerusakan beton juga dapat pula disebabkan oleh perbedaan angka muai antara agregat dan pasta semen, sehingga lekatan antar batuan menjadi berkurang banyak. Perbedaan ini dapat menimbulkan retak-retak pada beton. Tapi yang paling nyata kerusakan, beton mengelupas akibat oleh tekanan uap air atau gas yang terperangkap di dalam beton. Beton semakin rapat semakin mudah terjadi pengelupasan oleh panas, karena uap air tidak mudah mengalir melalui pori. (Priyosulistyo, 2004).

Pada suhu diatas 300°C perilaku beton mulai mengalami perubahan, beberapa penelitian menunjukkan bahwa beton mengalami penurunan kekuatan dalam mendukung beban. Hal ini juga ditandai dengan perubahan warna beton, pada saat suhu dibawah 300°C beton tidak mengalami perubahan warna tetapi saat suhu 300°C warna abu-abu normal dari beton yang menggunakan bahan dasar semen portland berubah menjadi merah muda terang, dan warnanya menjadi gelap saat mencapai intensitas maximum pada suhu 600°C ketika intensitasnya mulai berkurang, menjadi abu-abu keputih-putihan saat 800°C.

Hal senada juga disebutkan oleh Neville (1996), suatu struktur yang mengalami kebakaran pengaruhnya dapat diamati secara visual untuk memprediksi pada temperatur berapa struktur terbakar. Hal ini dapat dilihat pada perubahan warna yang tampak pada beton paska bakar. Saat beton menerima panas pada temperatur 300°C sampai 600°C, maka warna beton akan berubah menjadi merah muda atau kemerah-merahan. Pada temperatur antara 600°C sampai 900°C, warnanya berubah menjadi keabu-abuan dan diatas temperatur 900°C berubah menjadi kekuning-kuningan.

Uraian perilaku beton paska bakar yang telah diuraikan di atas pada dasarnya masih terbatas pada beton normal (tanpa serat). Oleh karena itu masih terbuka kemungkinan penelitian lebih lanjut mengenai beton berserat paska bakar dengan berbagai rentang kuat tekan.

2.6. Sifat Termal Agregat

Sifat termal agregat mempengaruhi keawetan dan kualitas lain dari betonnya. Sifat-sifat utama sifat termal agregat yaitu [Neville,1996]:

- (1) Koefisien muai
- (2) Panas jenis
- (3) Penghantar panas

Koefisien muai beton bertambah dengan bertambahnya sifat muai agregat yang dipakai. Jika koefisien muai agregat dan pasta semen berbeda terlalu besar, maka jika terjadi perubahan suhu dapat mengakibatkan perbedaan gerakan sehingga dapat melepaskan lekatan antar agregat dan pasta. Jika koefisien muai kedua bahan tersebut berbeda lebih dari $5,4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, maka beton akan mudah retak jika mengalami proses panas-dingin, atau jika terjadi kebakaran.

Koefisien muai agregat tergantung pada jenis bahan agregatnya. Sebagian besar agregat mempunyai koefisien muai antara $5,4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ dan $12,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ adapun koefisien muai pasta semen berkisar antara $10,8 \times 10^{-6}$ dan $16,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Panas jenis agregat perlu diperhitungkan jika beton dipakai sebagai beton massa, dan sifat penghantaran panas perlu diperhitungkan jika beton dipakai sebagai bahan isolasi. Beton massa sendiri adalah beton yang dituang dalam volume besar, yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaannya besar.

Tipe agregat mempengaruhi respon beton terhadap temperatur tinggi. Penurunan kekuatan sangat rendah ketika agregat tidak mengandung silika dengan limestone, batuan beku dan terutama dengan batu pecah. Beton dengan sifat penghantar panas yang rendah merupakan hal yang baik dalam ketahanan api.

Abrams menyatakan bahwa temperatur diatas 430°C agregat silika pada beton hilang pada proporsi yang besar dimana kekuatannya dibandingkan dengan beton yang terbuat dari batu gamping atau agregat ringan pada suhu mendekati 800°C , tidak tampak perbedaannya (Neville, 1996).

2.7. Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton pada Temperatur Tinggi dan Ketahanannya Terhadap Api

2.7.1. Kuat tekan beton pada temperatur tinggi

Kekuatan tekan beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar dan halus, air, dan beberapa jenis campuran tambahan yang mungkin dapat ditambahkan. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama didalam penentuan kekuatan beton. Semakin rendah perbandingan air-semen, semakin tinggi kekuatan beton.

Pada saat bangunan gedung mengalami kebakaran, maka struktur beton akan mengalami pemanasan. Suhu ruangan bias mencapai lebih dari 900°C. Karena hukum perpindahan panas, suhu dipermukaan struktur beton akan lebih rendah, apalagi di bagian tengahnya, akan lebih rendah lagi. Akibat pemanasan, pasta semen dan agregat dapat mengalami perubahan fisik dan kimia yang akan berpengaruh pada kekuatannya. Partowiyanto dan Sudarmadi (2003) mengungkapkan bahwa untuk suhu sampai 300°C kekuatan sisa dari beton masih cukup tinggi sekitar 80%. Untuk suhu diatas 500°C penurunan kekuatan sisa yang terjadi sangat tajam. Pada suhu 700°C kekuatan sisanya hanya tinggal 35%, sehingga praktis beton dianggap tidak memiliki kekuatan struktural. Sidibe (2000) mengungkapkan bahwa kuat tekan beton setelah dibakar pada temperatur 400°C, 600°C, dan 800°C adalah masing-masing sebesar 35%, 60% dan 80% terhadap kondisi normal. Atau bisa dikatakan bahwa kekuatan sisa untuk temperatur 400°C, 600°C, dan 800°C adalah 65%, 40% dan 20%.

Kuat tekan beton setelah mengalami pengapian sampai suhu 600°C memberikan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan ini disebabkan karena perbedaan kekuatannya, perbedaan lamanya pada temperatur tinggi, perbedaan dari sifat agregat, maupun perbedaan yang disebabkan karena material yang tersedia pada lokasi penelitian. Sehingga pada kenyataannya sulit dipastikan penurunannya, karena kuat tekan beton dipengaruhi hal tersebut di atas. Oleh Naville ditunjukkan bahwa kuat tekan beton akan semakin menurun dengan adanya peningkatan temperatur.

Pada penelitian ini faktor waktu (lama pembakaran) akan dimasukkan juga pada uji kuat tekan, juga perbandingannya terhadap mutu beton. Apakah nantinya prosentase penurunan akan sama pada setiap mutu beton, karena tes pada beton mutu tinggi memberikan kesan relatif penurunan

kekuatan lebih tinggi dari pada beton mutu normal. Tetapi pada penelitian ini terbatas pada beton mutu normal.

Pada tes bakar beton jelas tampak bahwa kadar air berpengaruh pada kuat tekan, dimana jumlah air yang berlebihan pada saat awal pembakaran menyebabkan pemisahan. Pada dasarnya kadar air pada beton adalah faktor yang sangat penting menentukan perilaku struktur pada temperatur tinggi.

2.7.2. Modulus elastisitas pada temperatur tinggi

Menurut Neville Modulus elastisitas pada suhu 21°C sampai dengan 96°C tidak banyak terjadi perubahan, tetapi modulus elastisitas mengalami penurunan pada suhu diatas 121°C. Meskipun demikian ketika air dapat keluar dari beton akibat terkena panas, tampak kecenderungan modulus elastisitas mengalami penurunan yaitu antara 50°C sampai dengan 800°C. Pengendoran dari daya lekat mungkin menjadi penyebabnya dalam hal ini. Penurunan modulus elastisitas beton akibat temperatur tinggi pada dasarnya dipengaruhi oleh beberapa faktor yang sama pada pengaruh kuat tekan beton akibat temperatur tinggi.

Berdasarkan uraian hasil penelitian yang telah dilakukan pada beton paska bakar di atas terlihat bahwa suhu beton yang dibakar mencapai 800°C, oleh karena itu perlu dikembangkan di dalam penelitian ini beton berserat baja yang dibakar pada suhu yang lebih tinggi yaitu 900°C.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental. Pembakaran benda uji pada tahun pertama menggunakan krematorium yang ada di kota Semarang. Di dalam tungku krematorium dapat diatur suhu sesuai dengan yang kita inginkan.

3.1. Program Eksperimental

3.1.1. Parameter Pengujian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku beton berserat baja mencakup beton tanpa dibakar maupun beton yang dibakar. Parameter pengujian yang ditinjau kuat tekan beton (f'_c) yaitu 30, 50 dan 70 MPa, jenis serat (kawat baja dan karung goni sebagai pembanding) dan variasi suhu (300°C, 600°C dan 900°C).

3.1.2. Material

a. *Semen*

Semen yang digunakan adalah Semen tipe I.

b. *Agregat Halus*

Agregat halus yang digunakan adalah pasir Muntilan.

c. *Agregat Kasar*

Agregat kasar yang digunakan adalah dari daerah Semarang.

d. *Air*

Air yang digunakan adalah air yang memenuhi persyaratan untuk air campuran beton.

e. Serat baja (kawat bendrat)

Kawat bendrat yang digunakan adalah yang terdapat di pasaran, dimana digunakan kawat bendrat dengan panjang maksimum 5 cm. Kandungan serat baja yang digunakan adalah 0,5% dari volume beton.

f. Serat karung goni

Di dalam penelitian ini juga digunakan serat karung goni sebagai perbandingan untuk mengetahui perilaku mekaniknya dari masing-masing serat.

3.1.3. Spesifikasi Benda Uji

Benda uji yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah silinder beton standar dengan ukuran diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm dan balok prisma 15x15x60 cm untuk pengujian modulus lentur. Perincian rencana benda uji dapat dilihat pada tabel 3.1, 3.2 dan 3.3.

Tabel 3.1. Rencana Jumlah Benda Uji Beton $f_c' \approx 30$ MPa

Jenis Pengujian	Beton kontrol	Suhu 300°C	Suhu 600°C	Suhu 900°C
		6 jam	6 jam	6 jam
Kuat tekan (f_c')	6	6	6	6
Kuat Tarik	6	6	6	6
Modulus Elastisitas	6	6	6	6
Modulus lentur	6	6	6	6

Tabel 3.2. Rencana Jumlah Benda Uji Beton $f_c' \approx 50$ MPa

Jenis Pengujian	Beton kontrol	Suhu 300°C	Suhu 600°C	Suhu 900°C
		6 jam	6 jam	6 jam
Kuat tekan (f_c')	6	6	6	6
Kuat Tarik	6	6	6	6
Modulus Elastisitas	6	6	6	6
Modulus lentur	6	6	6	6

Tabel 3.3. Rencana Jumlah Benda Uji Beton $f_c' \approx 70$ MPa

Jenis Pengujian	Beton kontrol	Suhu 300°C	Suhu 600°C	Suhu 900°C
		6 jam	6 jam	6 jam
Kuat tekan (f_c')	6	6	6	6
Kuat Tarik	6	6	6	6
Modulus Elastisitas	6	6	6	6
Modulus lentur	6	6	6	6

3.1.4. Desain campuran beton

Desain campuran beton adalah berdasarkan SNI dan untuk beton mutu tinggi mengacu kepada ACI yang telah dimodifikasi. Desain campuran beton ditunjukkan pada Tabel 3.4.

3.1.5. Pengujian

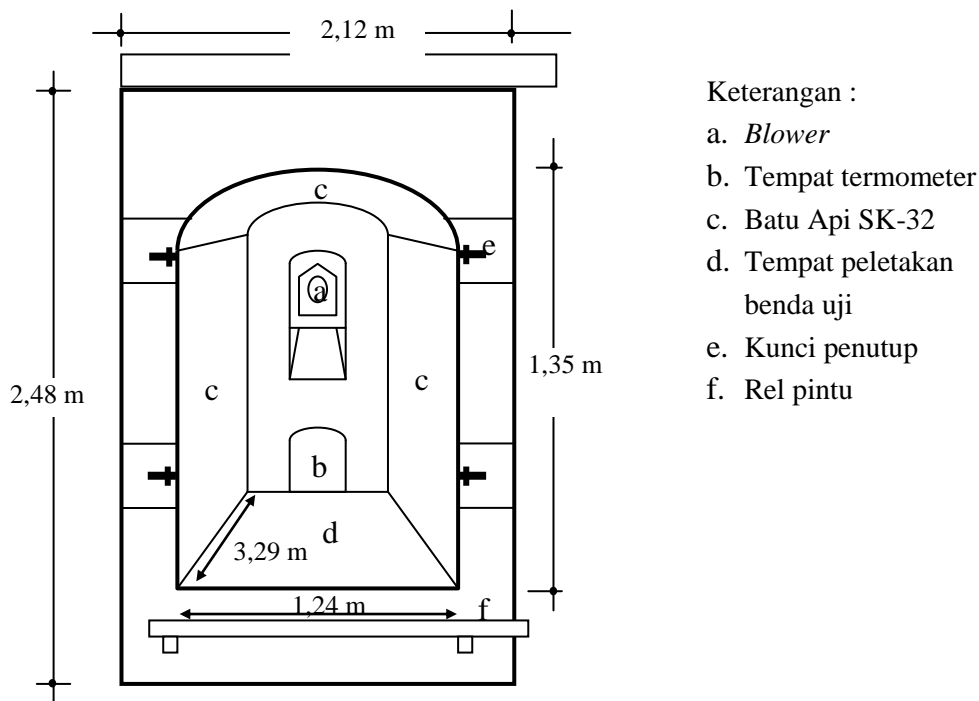
Pengujian mengacu kepada ASTM, dimana pembakaran benda uji dilaksanakan setelah benda beton mencapai umur lebih dari 120 hari.

Tabel 3.4. Desain campuran beton

Materials	f_c' target (30 MPa)	f_c' target (50 MPa)	f_c' target (70 MPa)
Cement (Kg/m^3)	350	419.98	485
Fly Ash (Kg/m^3)	-	74.11	82.83
Water (Lt/m^3)	200	160	140
w/c	0.53	0.38	0.30
Viscocrete 0,5% (lt/m^3)	-	6.228	9.28
Fine Aggregate (Kg/m^3)	722.9	696.62	662.07
Coarse Aggregate (Kg/m^3)	886.8	1044.93	1080.22

3.2. Ruang pembakaran

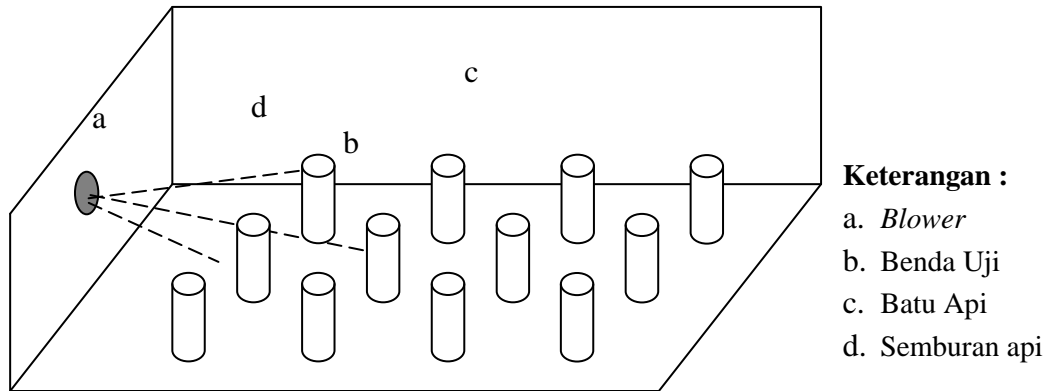
Tempat pembakaran terbuat dari susunan batu api SK-32 yang dilapisi asbes tahan panas dan kemudian besi pada bagian luarnya. Pada ruang pembakaran ini ada bagian untuk pemberi dan penyedot udara, sehingga hasil pembakarannya bisa bagus, tidak berjelaga dan dapat diketahui secara jelas perubahan warna beton akibat terbakar. Ruang dengan ukuran $1,35 \times 1,24 \times 3,29$ meter cukup luas untuk membakar 12 benda uji untuk setiap pembakaran, namun tidak mempengaruhi hasil pembakaran. Gambar 1 memperlihatkan bentuk dari ruang pembakaran.



Gambar 3.1. Tampak Depan Ruang Pembakaran

3.3. Penataan Benda Uji

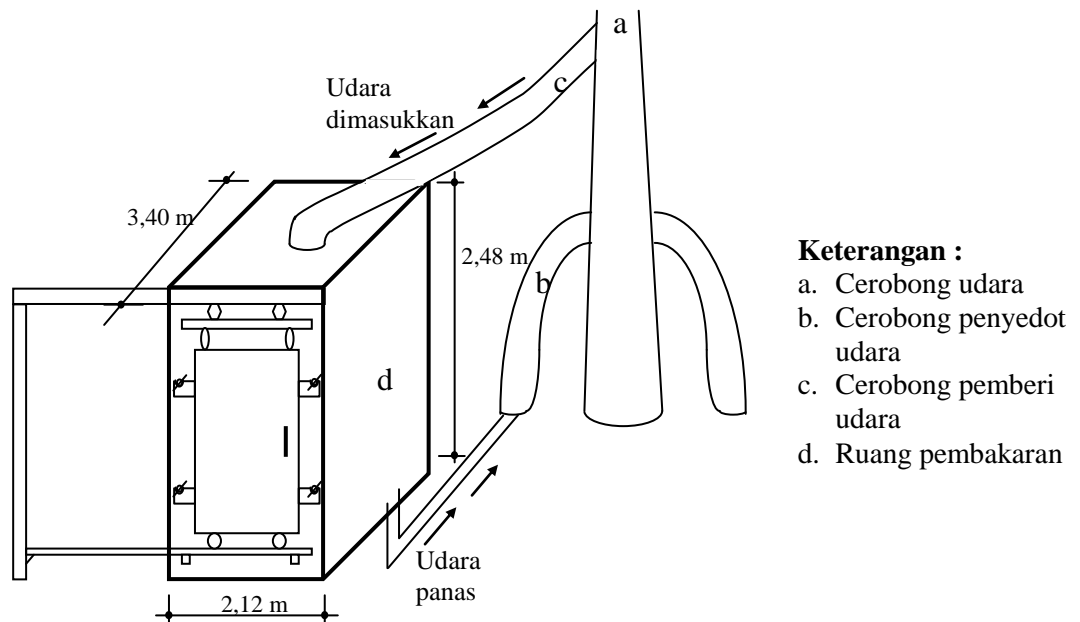
Benda uji ditata berdiri satu persatu tanpa ada yang ditumpuk. Gambar 2 memperlihatkan penataan benda uji untuk setiap pembakaran.



Gambar 3.2. Bentuk Penataan Benda Uji

3.4. Mekanisme kerja alat pembakar beton

Alat yang digunakan untuk pembakaran mempunyai dua tenaga untuk menjalankan pembakaran, yaitu listrik dan solar. Listrik untuk menjalankan *blower* angin sedangkan solar untuk menjalankan api.



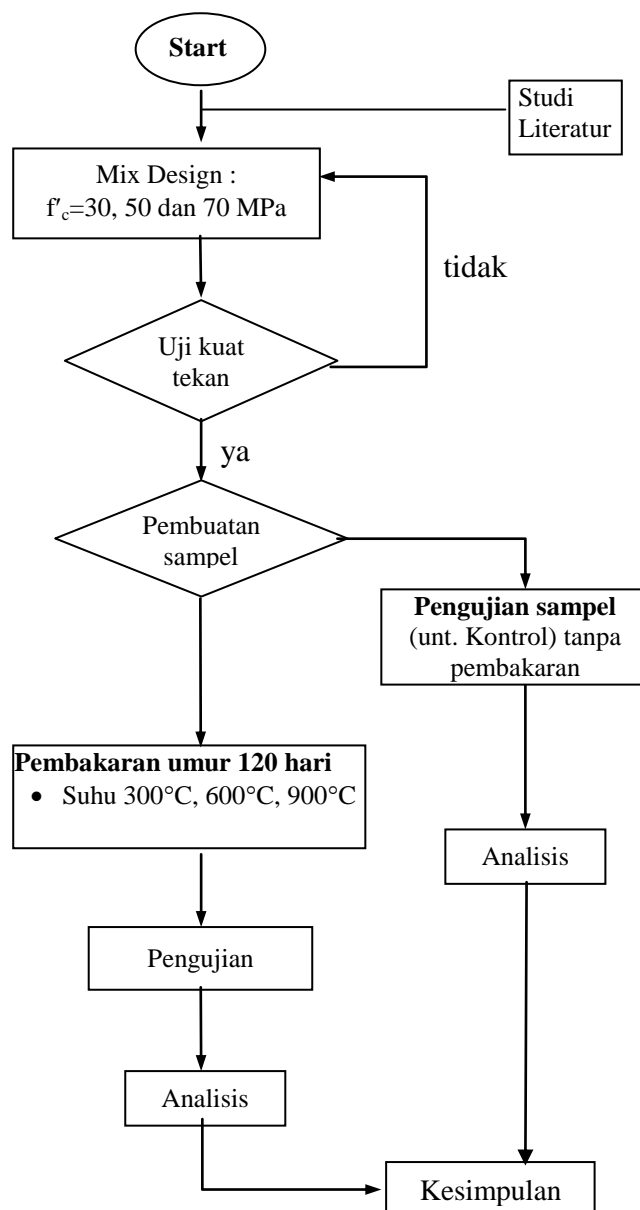
Gambar 3.3. Mekanisme pembakaran benda uji

Proses pembakaran dimulai dengan menutup semua pintu ruangan dan dikunci rapat-rapat, kemudian listrik dinyalakan untuk suplai angin. Kemudian *blower* api dinyalakan yang

dilanjutkan dengan menyalakan penyedot angin, dimana penyedot angin ini berfungsi supaya hawa panas tidak terlalu berkumpul di dalam ruangan, sehingga mengakibatkan ledakan. Gambar 3 memperlihatkan sistem sirkulasi udara di dalam ruang pembakaran.

3.5. Bagan Alir Penelitian

Secara umum bagan alir penelitian tahun pertama adalah sama seperti pada gambar di bawah. Hasil penelitian tahun pertama akan digunakan untuk pembuatan dan pengujian balok beton berserat pada suhu tinggi.



Gambar 3.4. Bagan alir penelitian

BAB IV
HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji yang dilakukan mencakup benda uji kontrol maupun benda uji yang dibakar. Hasil pengecoran menunjukkan bahwa sifat workabilitas beton berserat baja maupun beton berserat karung goni berdasarkan nilai slump masih dapat terjaga dengan baik dengan cara menambahkan Viscocrete sebesar 0,5%. Pembakaran benda uji dilaksanakan setelah beton berumur 120 hari.

4.2. Beton Serat Kawat Baja

4.2.1. Kuat tekan

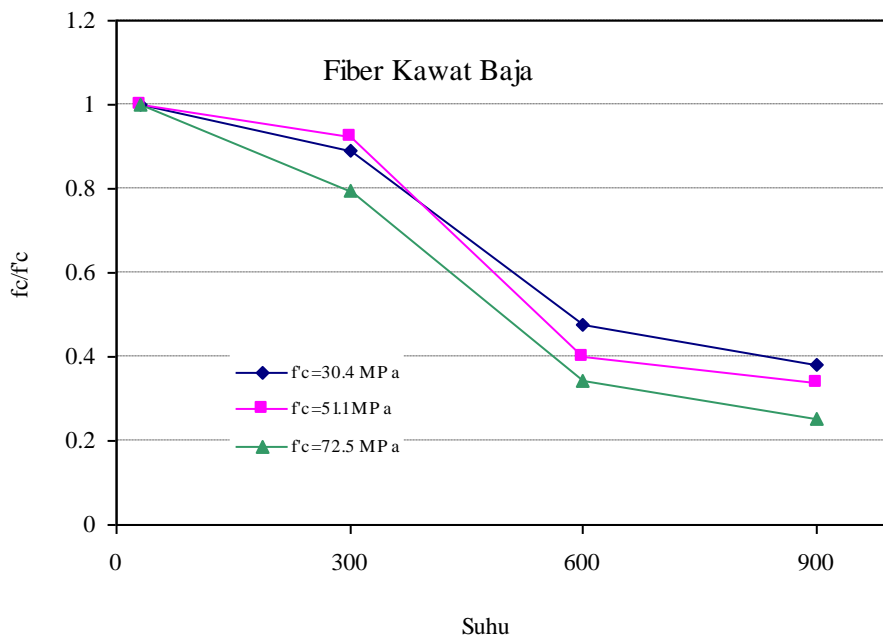
Pengujian kuat tekan beton adalah terhadap silinder diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dengan menggunakan alat tekan kapasitas 1000 kN (100 Ton). Sesuai standar ASTM, kuat tekan silinder standar diameter 150 mm, tinggi 300 mm diperoleh dengan memberi faktor koreksi tegangan hasil uji tekan silinder 100/200 sebesar 0.95.

Tabel 4.1. Hasil uji kuat tekan beton serat Kawat Baja

Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja Umur 28 hari	Benda uji	Slump rata- rata (mm)	Beban Maksimum dan Kuat Tekan (Umur 120 hari)							
			Spesimen kontrol		Suhu 300°		Suhu 600°		Suhu 900°	
			Pmax. (Ton)	f _c (MPa)	Pmax. (Ton)	f _c (MPa)	Pmax. (Ton)	f _c (MPa)	Pmax. (Ton)	f _c (MPa)
30.4 MPa	1	135	25.5	30.86	21.2	27.01	11	14.01	9.5	12.10
	2		24.5	29.65	21	26.75	12.1	15.41	8.5	10.83
	3		28	33.89	22	28.03	11.4	14.52	9.5	12.10
	4		26	31.46	20.5	26.11	10.6	13.50	8.5	10.83
	5		22.5	27.23	21	26.75	11.1	14.14	9.7	12.36
	6		26.5	32.07	22	28.03	11.8	15.03	8.8	11.21
	Rata-rata		25.5	30.86	21.28	27.11	11.333	14.44	9.0833	11.57
51.1 MPa	1	130	40.5	49.01	33.5	42.68	16.5	21.02	14	17.83
	2		43	52.04	38.5	49.04	15	19.11	13.5	17.20
	3		45	54.46	37.5	47.77	15.7	20.00	13	16.56
	4		43	52.04	37.9	48.28	16	20.38	13.8	17.58
	5		44.5	53.85	38.2	48.66	17	21.66	13.6	17.32
	6		39	47.20	36.8	46.88	15.5	19.75	13.3	16.94
	Rata-rata		42.50	51.43	37.07	47.22	15.95	20.32	24.131	17.24
72.5 MPa	1	60	62	75.03	46	58.60	18.5	23.57	15	19.11
	2		59	71.40	49.7	63.31	19.5	24.84	12.5	15.92
	3		58.5	70.80	45	57.32	20	25.48	14.8	18.85
	4		63.5	76.85	44.5	56.69	19.7	25.10	15.2	19.36
	5		64	77.45	44.5	56.69	19.5	24.84	13.4	17.07
	6		57.5	69.59	42.6	54.27	20.5	26.11	14.6	18.60
	Rata-rata		60.75	73.52	45.38	57.81	19.62	24.99	14.25	18.15

Tabel 4.1 menunjukkan hasil uji tekan spesimen kontrol dan spesimen yang telah dibakar. Secara umum, pengaruh perubahan suhu pada spesimen dengan kuat tekan beton mutu normal hingga mutu tinggi menunjukkan bahwa penurunan kuat tekan beton mutu normal dan menengah ($f'_c=30.4$ Mpa dan $f'_c=51.1$ Mpa) serat kawat baja yang dibakar pada suhu 300°C sekitar 10%. Namun pada spesimen beton kuat tekan mutu tinggi ($f'_c=72.5$ Mpa), penurunan kuat tekan lebih cepat yaitu sekitar 20%. Lebih tingginya degradasi kuat tekan pada beton mutu tinggi ini dimungkinkan karena jumlah air yang dimungkinkan lebih sedikit (w/c lebih rendah).

Degradasi kuat tekan beton pasca bakar terlihat signifikan pada pembakaran 600°C , dimana rata-rata penurunan kuat tekan beton untuk berbagai kuat tekan adalah 60%. Degradasi kuat tekan lebih tinggi terjadi pada kuat tekan beton pasca bakar dengan suhu 900°C . Gambar 4.1 memperlihatkan penurunan kuat tekan beton terhadap peningkatan suhu, dimana setelah suhu 300°C penurunan kuat tekan lebih tajam dibandingkan penurunan kuat tekan dari suhu normal ke suhu 300°C .

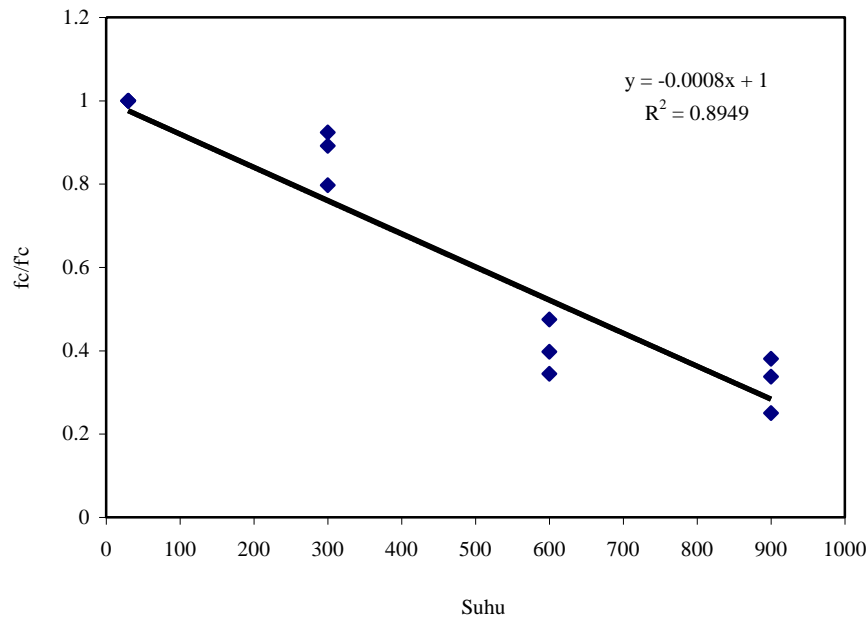


Gambar 4.1. Hubungan kuat tekan normalisasi terhadap perubahan suhu

Berdasarkan data hasil pengujian kuat tekan terhadap perubahan suhu pembakaran di atas, diperoleh persamaan hubungan antara kuat tekan terhadap suhu yang diturunkan berdasarkan regresi linier yang diperlihatkan pada Gambar 4.2. Hasil regresi diperoleh persamaan :

$$\frac{f_c}{f'_c} = 1 - 0.0008T \quad ; R^2 = 0.89 \quad (4.1)$$

Dimana f_c = kuat tekan benda uji (MPa)
 f'_c = kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)
 T = suhu (dalam °C)



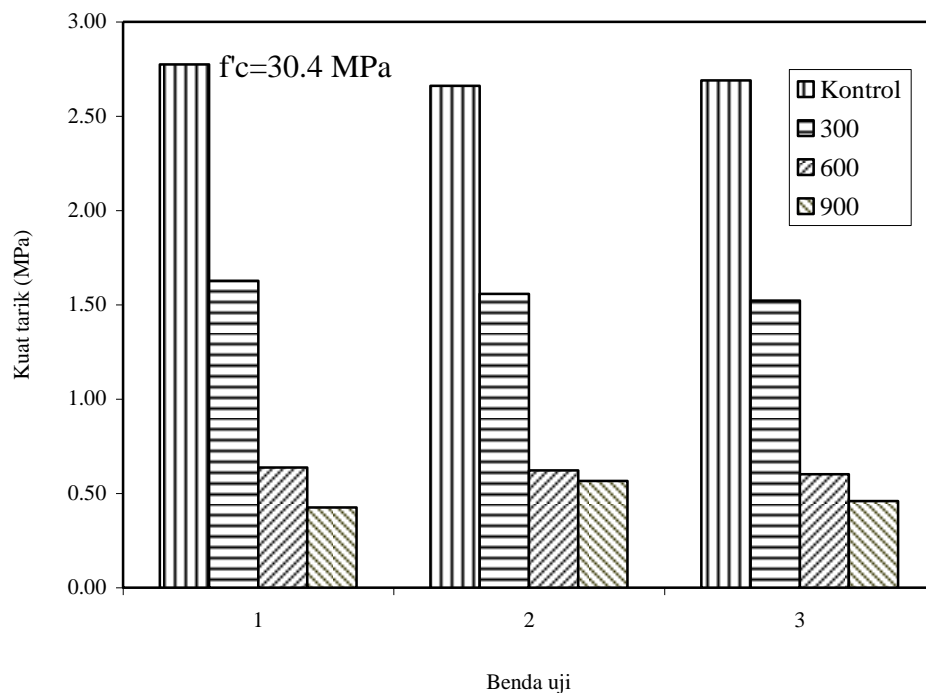
Gambar 4.2. Regresi Hubungan kuat tekan normalisasi terhadap perubahan suhu

4.2.2. Kuat Tarik Beton Serat Kawat Baja

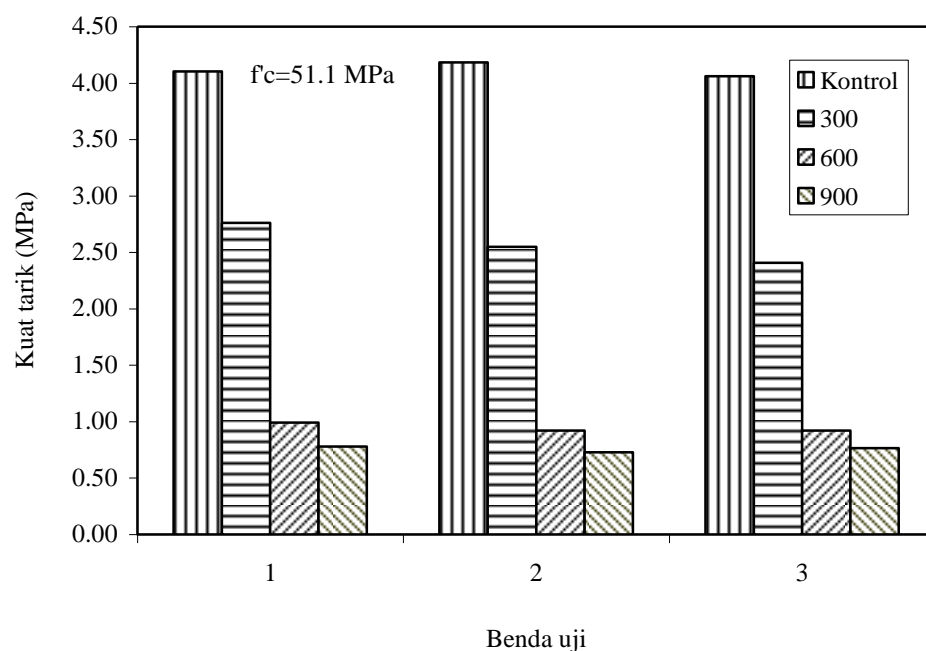
Tabel 4.2. Hasil uji kuat tarik beton serat Kawat Baja

Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja; f_c	Benda uji	Beban Maksimum dan Kuat Tarik							
		Spesimen kontrol		Suhu 300°C		Suhu 600°C		Suhu 900°C	
		Pmax. (Ton)	f_t (MPa)	Pmax. (Ton)	f_t (MPa)	Pmax. (Ton)	f_t (MPa)	Pmax. (Ton)	f_t (MPa)
30.4 MPa	1	39.2	2.77	23	1.63	9	0.64	6	0.42
	2	37.6	2.66	22	1.56	8.8	0.62	8	0.57
	3	38	2.69	21.5	1.52	8.5	0.60	6.5	0.46
	rata-rata	38.27	2.71	22.17	1.57	8.77	0.62	6.83	0.48
51.1 MPa	1	58	4.10	39	2.76	14	0.99	11	0.78
	2	59.1	4.18	36	2.55	13	0.92	10.3	0.73
	3	57.4	4.06	34	2.41	13	0.92	10.8	0.76
	rata-rata	58.17	4.12	36.33	2.57	13.33	0.94	10.70	0.76
72.5 MPa	1	69	4.88	46	3.26	18.5	1.31	11	0.78
	2	70.5	4.99	45	3.18	19	1.34	9	0.64
	3	72.4	5.12	44.5	3.15	19.2	1.36	8.6	0.61
	rata-rata	70.63	5.00	45.17	3.20	18.90	1.34	9.53	0.67

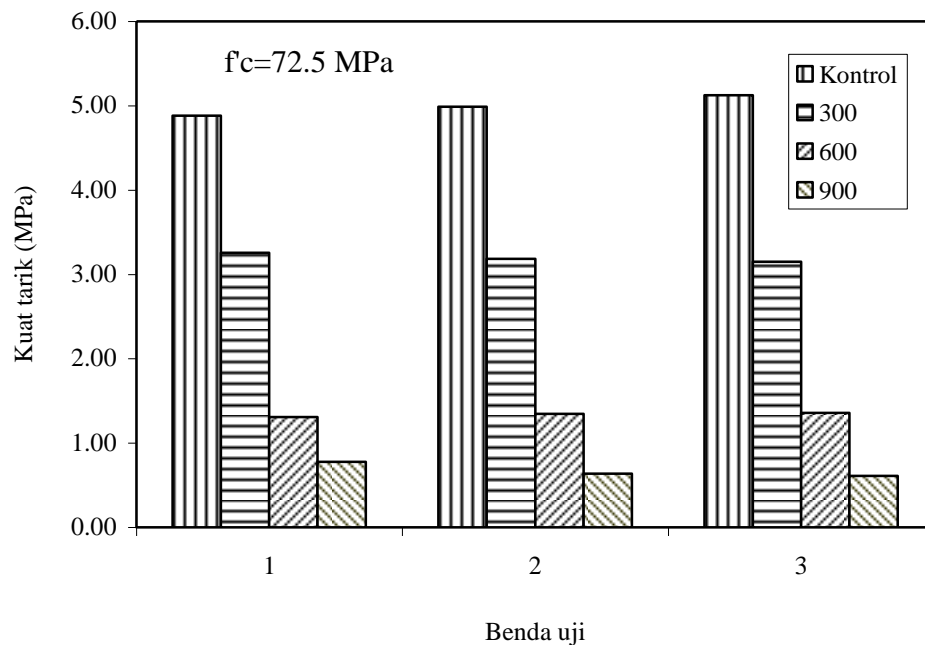
Hasil kuat tarik beton (f'_t) pada tabel 4.2 diperoleh berdasarkan hasil kuat belah silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm. Agak berbeda dengan perilaku spesimen terhadap beban tekan di atas, kuat tarik beton berserat baja cenderung lebih cepat turun pada suhu 300°C dan 600°. Kuat tarik beton paska bakar pada suhu 900° agak sedikit menurun dibandingkan kuat tarik pada suhu 600°C di atas. Gambar 4.3 sampai 4.5 memperlihatkan perilaku kuat tarik beton dari suhu normal hingga suhu 900°C.



Gambar 4.3. Kuat tarik beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.4$ MPa.



Gambar 4.4. Kuat tarik beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.1$ MPa.



Gambar 4.5. Kuat tarik beton dengan variasi suhu; $f'_c=72.5$ MPa.

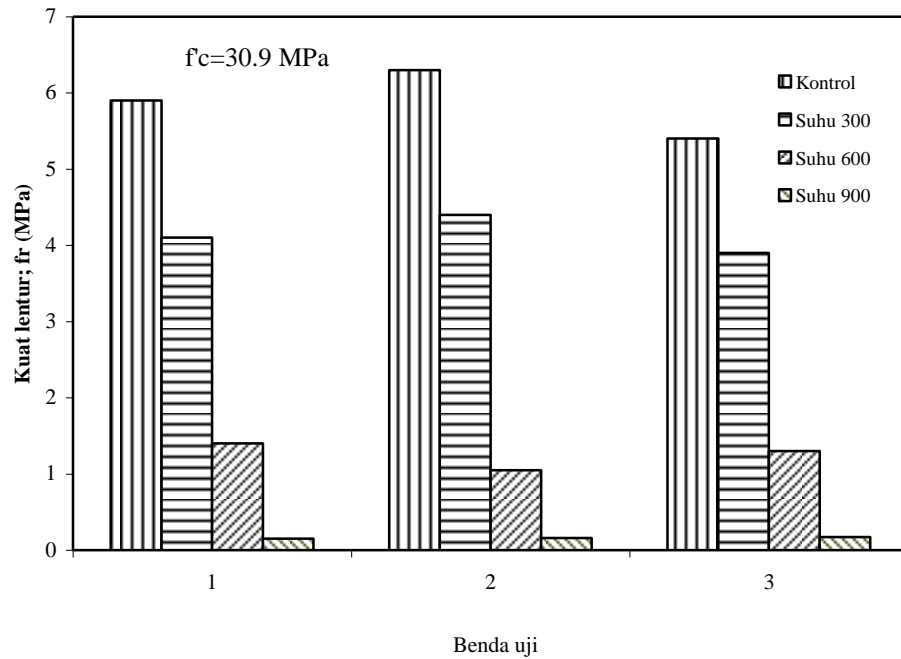
4.2.3. Modulus Lentur

Tabel 4.3. Hasil uji kuat (modulus) lentur beton serat Kawat Baja

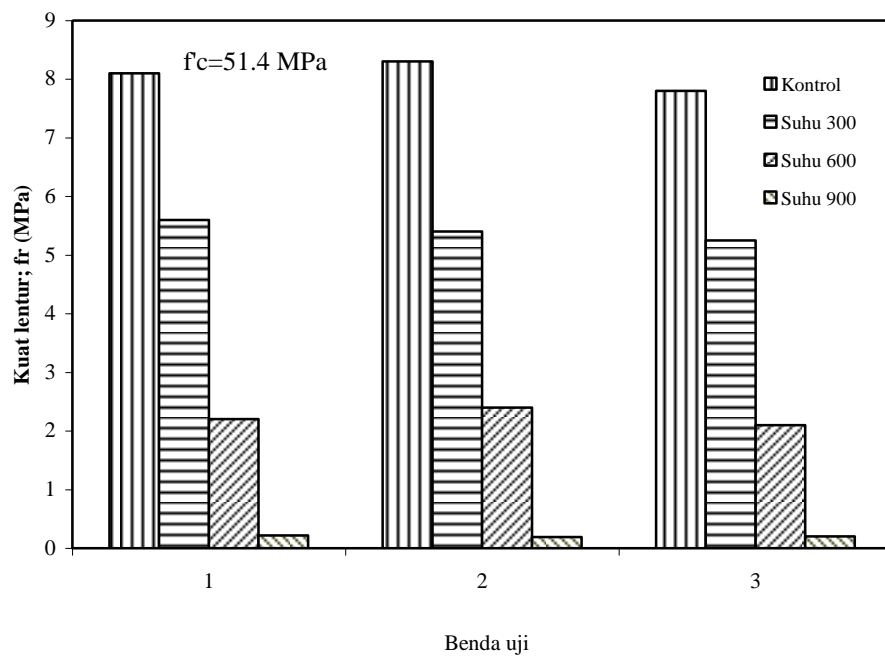
Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja	Benda uji	Modulus lentur			
		Spesimen kontrol	Suhu 300°	Suhu 600°	Suhu 900°
		fr (MPa)	fr (MPa)	fr (MPa)	fr (MPa)
30.9 MPa	1	5.9	4.1	1.4	0.15
	2	6.3	4.4	1.05	0.16
	3	5.4	3.9	1.3	0.17
	rata-rata	5.87	4.13	1.25	0.16
51.4 MPa	1	8.1	5.6	2.2	0.22
	2	8.3	5.4	2.4	0.19
	3	7.8	5.25	2.1	0.2
	rata-rata	8.07	5.42	2.23	0.20
73.5 MPa	1	11.1	7.2	3.9	0.78
	2	10.1	7.7	3.7	0.75
	3	11.6	7.2	3.65	0.74
	rata-rata	10.93	7.37	3.75	0.76

Hasil pengujian Modulus lentur (fr) pada tabel 4.3 di atas diperoleh berdasarkan hasil pengujian lentur terhadap prisma ukuran penampang 150x150 mm dan panjang 600 mm. Secara umum modulus lentur beton berserat baja cenderung lebih cepat turun pada suhu 300°C, 600°C dan

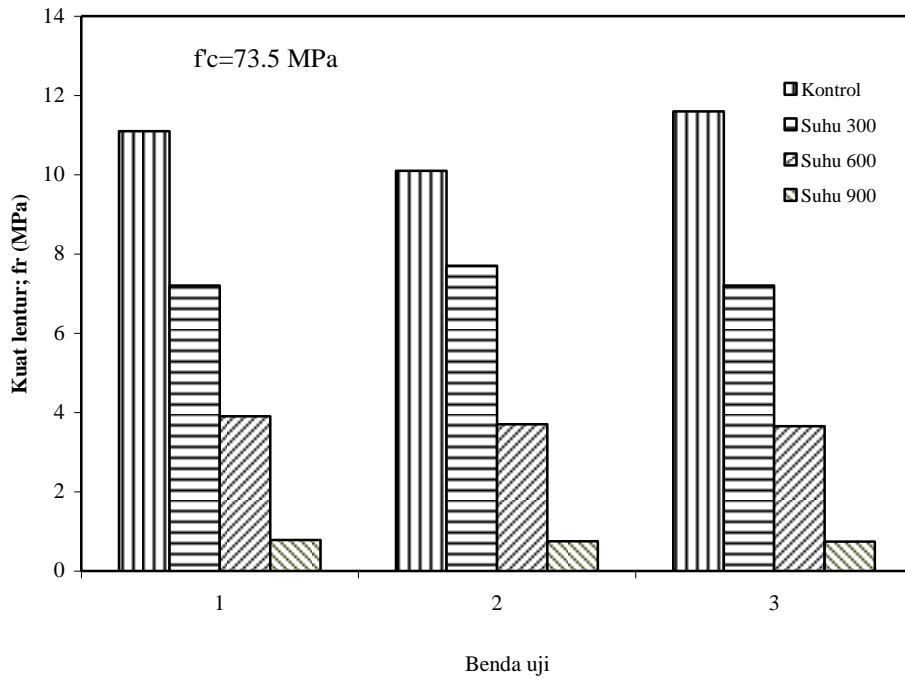
900°C. Gambar 4.6 sampai 4.8 memperlihatkan perilaku kuat lentur dari suhu normal hingga suhu 900°C.



Gambar 4.6. Kuat lentur beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.4$ MPa.



Gambar 4.7. Kuat lentur beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.4$ MPa.



Gambar 4.8. Kuat lentur beton dengan variasi suhu; $f_c=73.5$ MPa.

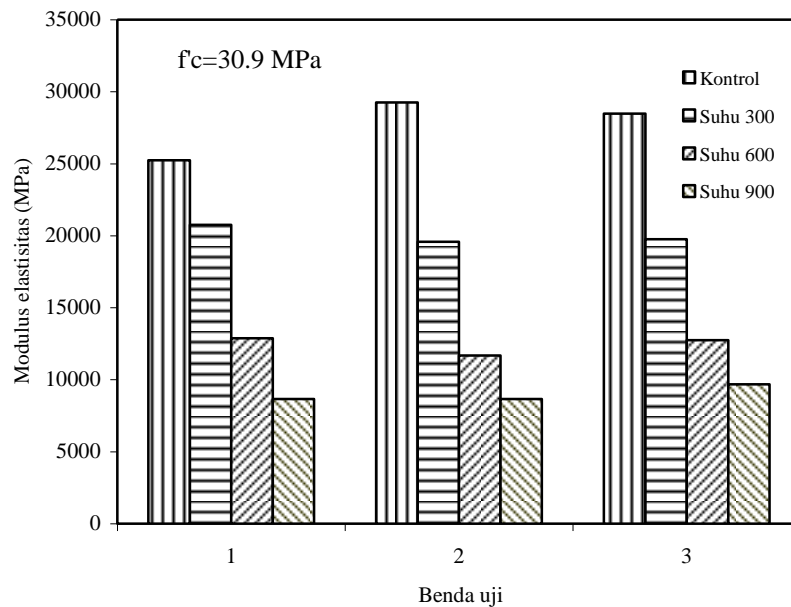
4.2.4. Modulus Elastisitas

Tabel 4.4 memperlihatkan hasil modulud elastisitas (E) beton serat Kawat Baja.

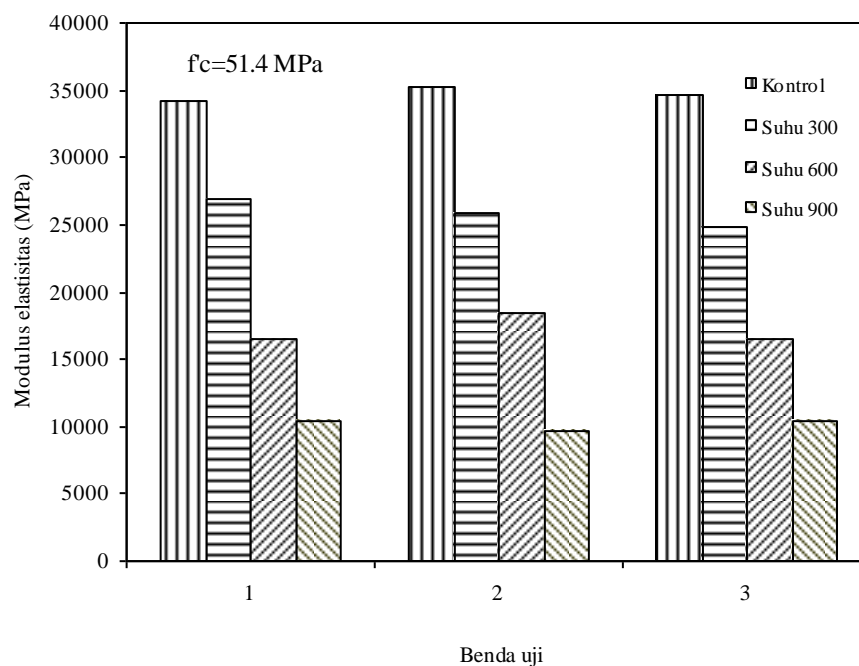
Tabel 4.4. Hasil uji modulus elastisitas beton serat Kawat Baja

Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja	Benda uji	Modulus Elastisitas; E (MPa)			
		Spesimen kontrol	Suhu 300°C	Suhu 600°C	Suhu 900°C
30.9 MPa	1	25236	20743	12876	8650
	2	29241	19574	11683	8658
	3	28478	19750	12750	9683
	rata-rata	27651.67	20022.33	12436.33	8997.00
51.4 MPa	1	34210	26960	16480	10465
	2	35252	25876	18463	9738
	3	34674	24769	16432	10468
	rata-rata	34712.00	25868.33	17125.00	10223.67
73.5 MPa	1	42489	33860	18765	14748
	2	39247	35987	19276	13499
	3	41478	36850	18760	13241
	rata-rata	41071.33	35565.67	18933.67	13829.33

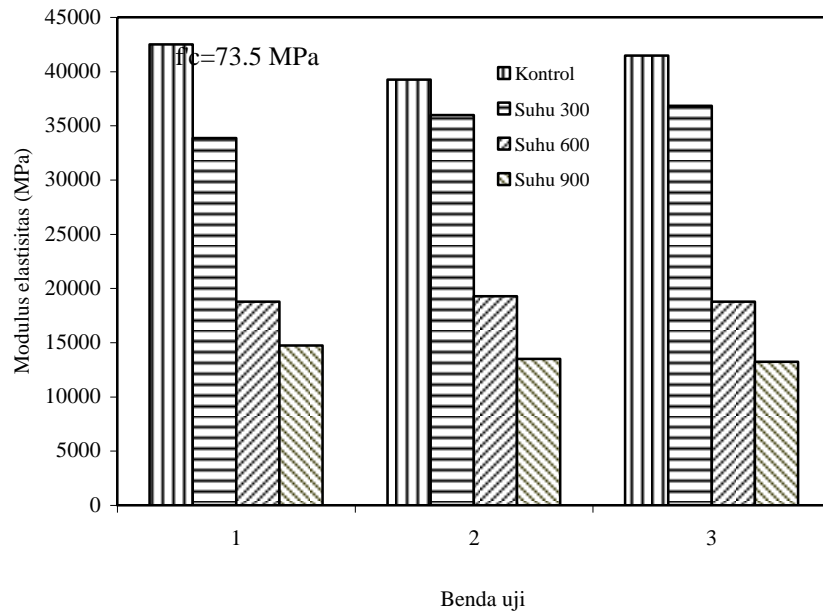
Pada berbagai kuat tekan beton menunjukkan bahwa dengan peningkatan suhu hingga 300°C, nilai E terhadap nilai spesimen kontrol menurun sebesar kurang lebih 30%, namun pada suhu hingga 600°C, nilai E turun hingga 50% dan turun lagi sebesar 75% pada suhu 900°C. Penurunan nilai E tersebut juga ditunjukkan pada gambar 4.9 s/d 4.11.



Gambar 4.9. Modulus elastisitas beton dengan variasi suhu; $f_c=30.4$ MPa.



Gambar 4.10. Modulus elastisitas beton dengan variasi suhu; $f_c=51.4$ MPa.



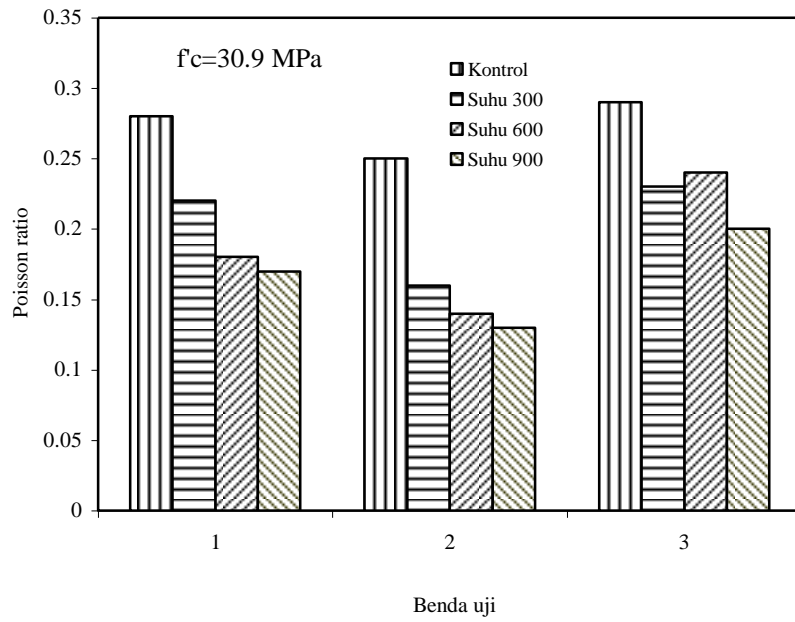
Gambar 4.11. Modulus elastisitas beton dengan variasi suhu; $f'_c=72.5$ MPa.

4.2.5. Poisson Ratio

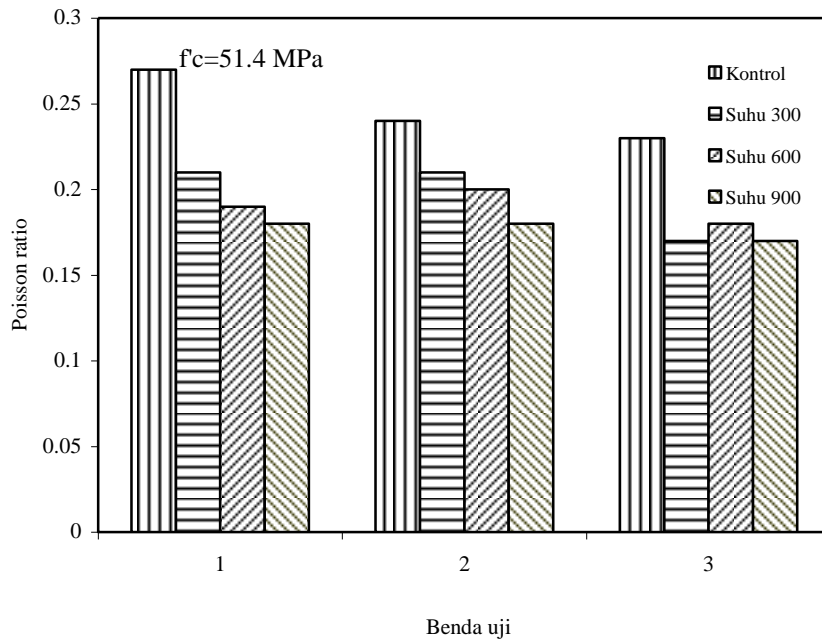
Nilai Poisson rati (ν) dengan variasi perbedaan suhu juga menunjukkan kecenderungan yang sama dengan nilai E seperti yang diuraikan di atas. Secara lengkap hasil pengujian Poisson ratio ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan gambar 4.12 hingga 4.14.

Tabel 4.5. Hasil uji Poisson ratio beton serat Kawat Baja

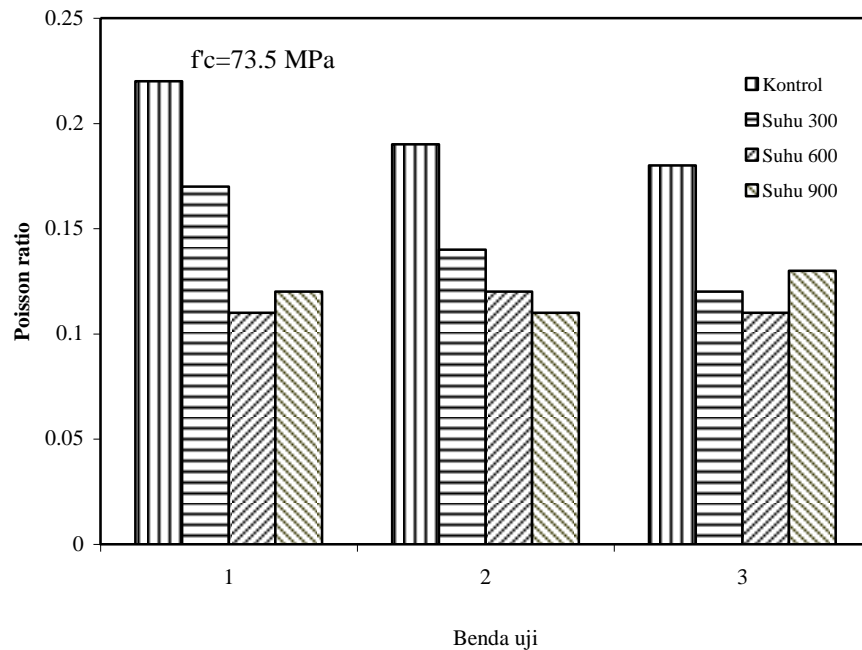
Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja	Benda uji	Poisson Ratio; ν			
		Spesimen kontrol	Suhu 300°C	Suhu 600°C	Suhu 900°C
30.9 MPa	1	0.28	0.22	0.18	0.17
	2	0.25	0.16	0.14	0.13
	3	0.29	0.23	0.24	0.2
	rata-rata	0.27	0.20	0.19	0.17
51.4 MPa	1	0.27	0.21	0.19	0.18
	2	0.24	0.21	0.2	0.18
	3	0.23	0.17	0.18	0.17
	rata-rata	0.25	0.20	0.19	0.18
73.5 MPa	1	0.22	0.17	0.11	0.12
	2	0.19	0.14	0.12	0.11
	3	0.18	0.12	0.11	0.13
	rata-rata	0.20	0.14	0.11	0.12



Gambar 4.12. Poisson ratio beton dengan variasi suhu; $f_c=30.9$ MPa.



Gambar 4.13. Poisson ratio beton dengan variasi suhu; $f_c=51.4$ MPa.



Gambar 4.14. Poisson ratio beton dengan variasi suhu; $f'_c=72.5$ MPa.

4.2.6. Perilaku Tegangan-Regangan

Hubungan tegangan-regangan beton serat Kawat Baja diperoleh dari hasil pengujian tekan silinder diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dengan sistem pengujian *Strain Control* dan menggunakan mesin tekan UTM kapasitas 1000 kN. Kecepatan pembebanan adalah 0.01/sec.

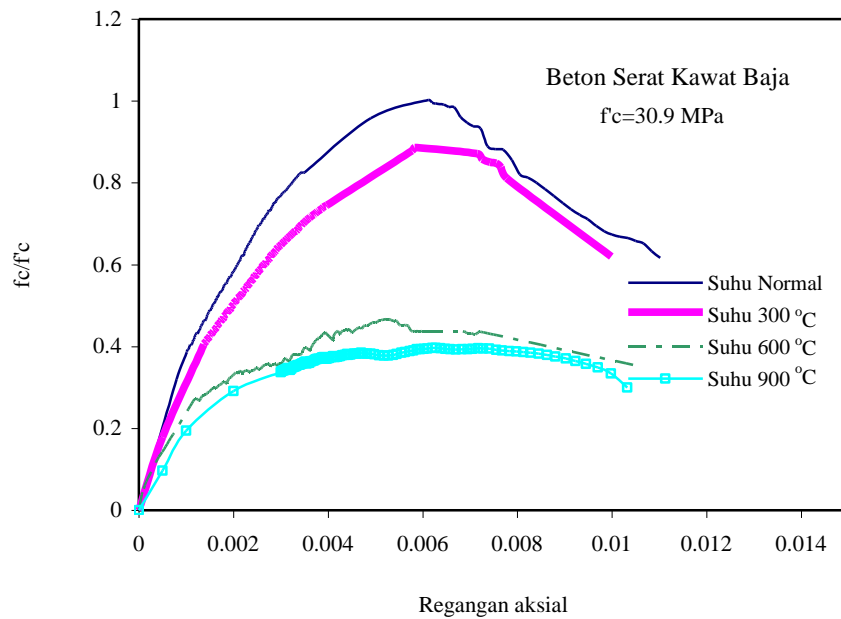
4.2.6.1. Pengaruh perubahan suhu

Perilaku tegangan-regangan pada kuat tekan beton 30.4 MPa (gambar 4.15) menunjukkan degradasi kuat tekan terhadap beton kontrol (pada suhu Normal). Kuat tekan dan daktilitas mengalami penurunan belum berarti pada suhu 300°C, namun pada suhu 900°C terjadi penurunan kuat tekan yang drastis (hingga 75%) terhadap spesimen suhu normal, meskipun daktilitas yang dihasilkan masih memadai. Perilaku daktilitas ini ditandai dari besarnya regangan hancur spesimen yang relatif panjang.

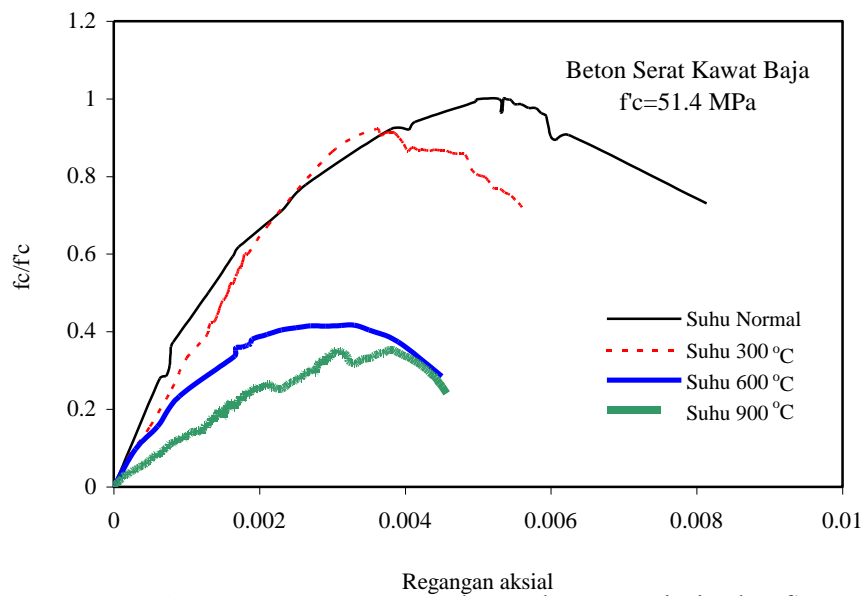
Pada kuat tekan beton 51.4 MPa, spesimen dengan suhu 300°C mengalami penurunan kuat tekan yang relatif sedikit namun daktilitasnya berkurang secara signifikan dibandingkan spesimen

kontrol (gambar 4.16). Pada suhu 600°C dan 900°C, kuat tekan dan daktilitas turun secara drastis.

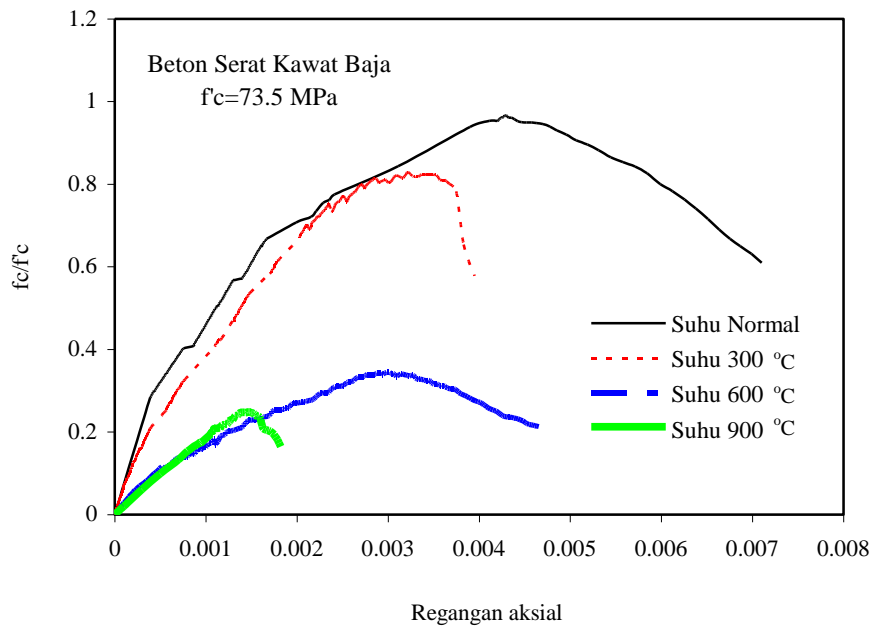
Perilaku tegangan-regangan pada beton mutu tinggi ($f'_c=72.5$ MPa) terlihat pada gambar 4.17. Perilaku yang terjadi memperlihatkan kemiripan dengan spesimen beton mutu menengah ($f'_c=51.4$ MPa) dalam hal penurunan kuat tekan dan daktilitas pada berbagai variasi suhu.



Gambar 4.15. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi suhu; $f'_c=30.9$ MPa.



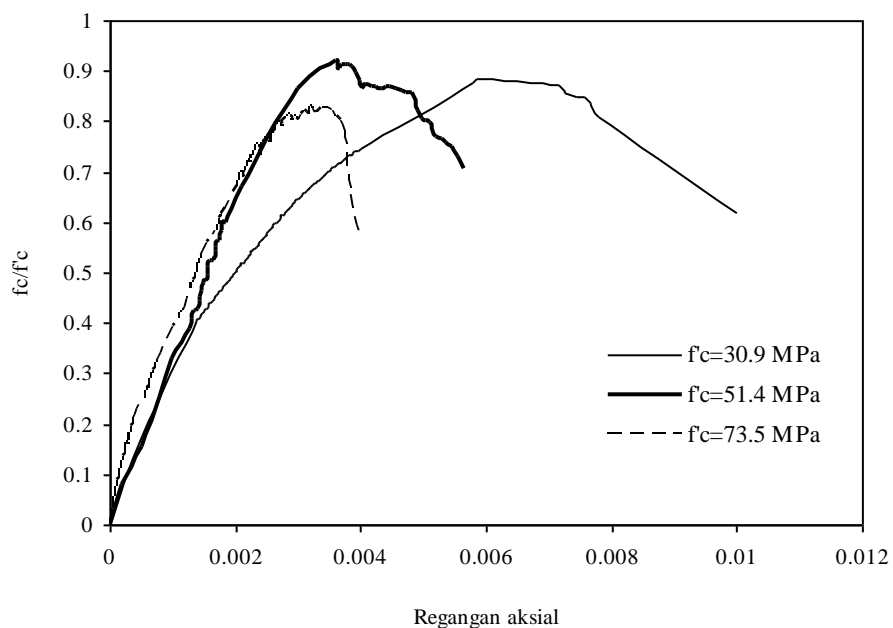
Gambar 4.16. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi suhu; $f'_c=51.4$ MPa.



Gambar 4.17. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi suhu; $f'_c = 73.5 \text{ MPa}$.

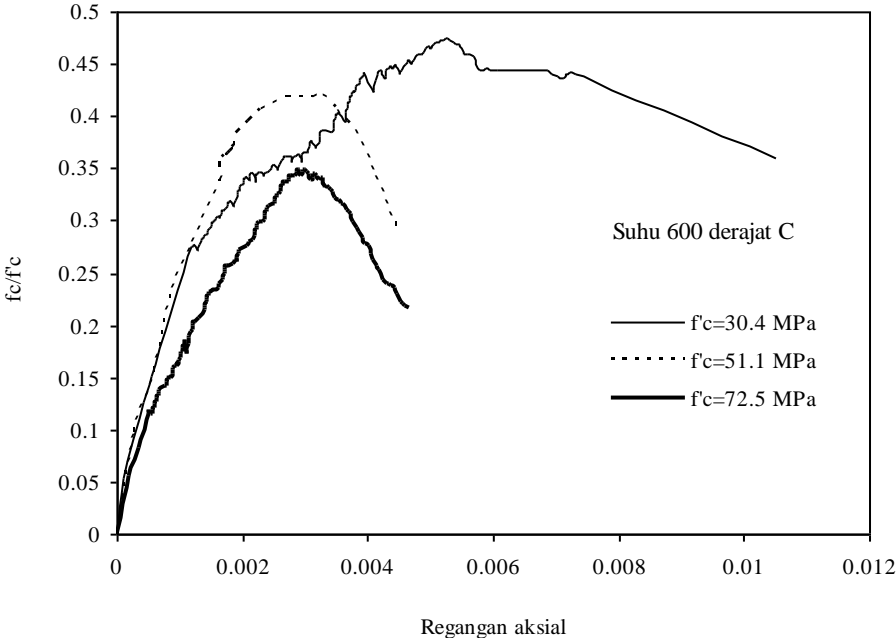
4.2.6.2. Pengaruh kuat tekan beton dengan suhu tetap

Gambar 4.18 adalah kurva tegangan-regangan beton berserat kawat baja pada suhu 300°C dengan variasi kuat tekan beton. Perilaku daktilitas beton mutu yang lebih rendah memperlihatkan perilaku yang mirip dengan beton normal (tanpa serat), dimana sifat daktilitas berkurang apabila kuat tekan beton meningkat.

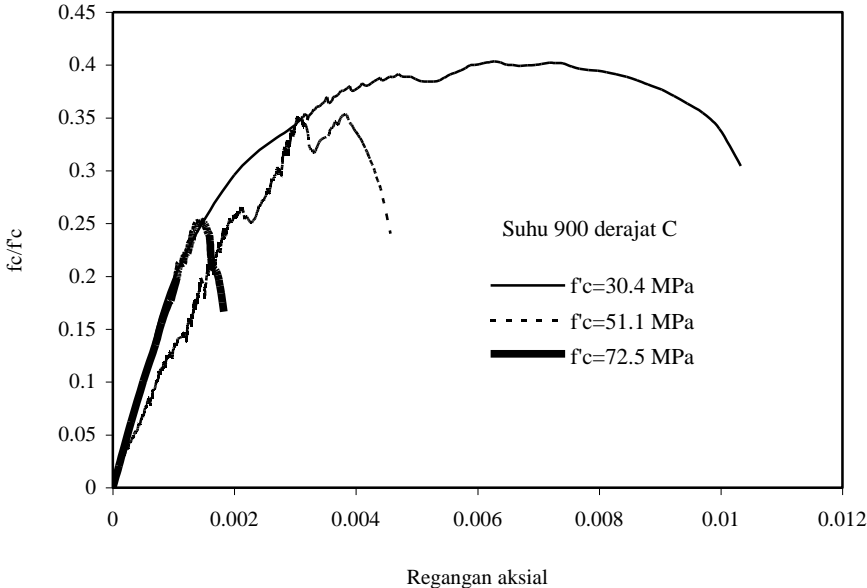


Gambar 4.18. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi f'_c , suhu 300°C .

Pada suhu 600°C dan suhu 900°C, daktilitas beton mutu normal ($f'_c=30.4$ MPa) terlihat masih cukup baik, namun pada beton mutu menengah dan mutu tinggi terjadi penurunan daktilitas yang cukup tinggi yang ditandai dengan lebih curamnya kurva respon puncak (gambar 4.19 dan 4.20).



Gambar 4.19. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi f'_c , suhu 600°C.



Gambar 4.20. Perilaku tegangan-regangan beton dengan variasi f'_c , suhu 900°C.

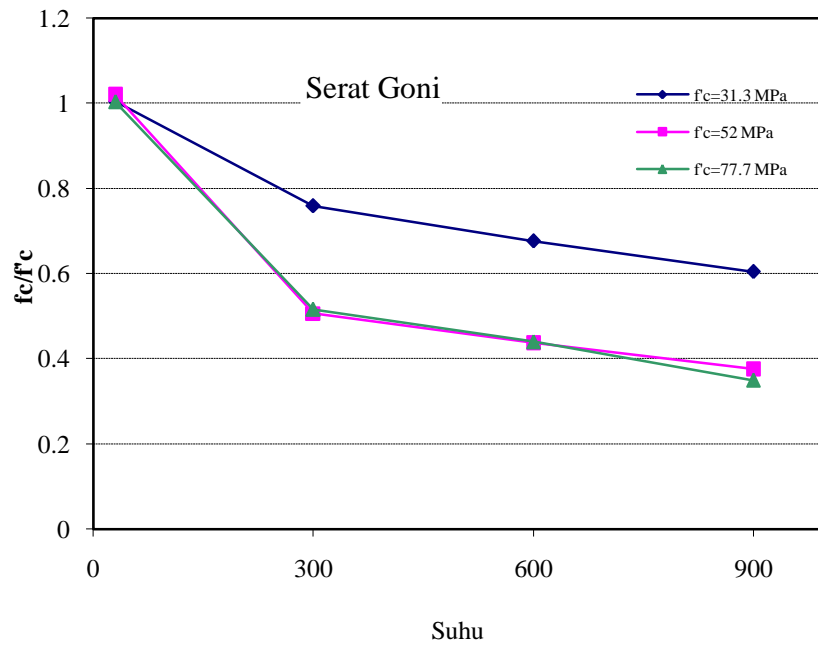
4.3. Beton serat Karung Goni

Hasil pengujian kuat tekan pada beton berserat Karung Goni terlihat pada gambar 4.6. Berbeda dengan berserat Kawat Baja di atas, pada kuat tekan beton mutu normal beton Serat karung Goni pada suhu 300°C mengalami penurunan di atas 20% dibanding beton kontrol (suhu normal). Bahkan pada suhu 600°C dan 900°C penurunan kuat tekan yang terjadi sangat signifikan terhadap kuat tekan beton kontrol (turun 50%).

Pada kuat tekan beton mutu menengah dan mutu tinggi, kuat tekan beton Serat karung Goni bahkan menurun drastis mulai suhu 300°C hingga 900°C.

Tabel 4.6. Hasil uji tekan beton serat Karung Goni

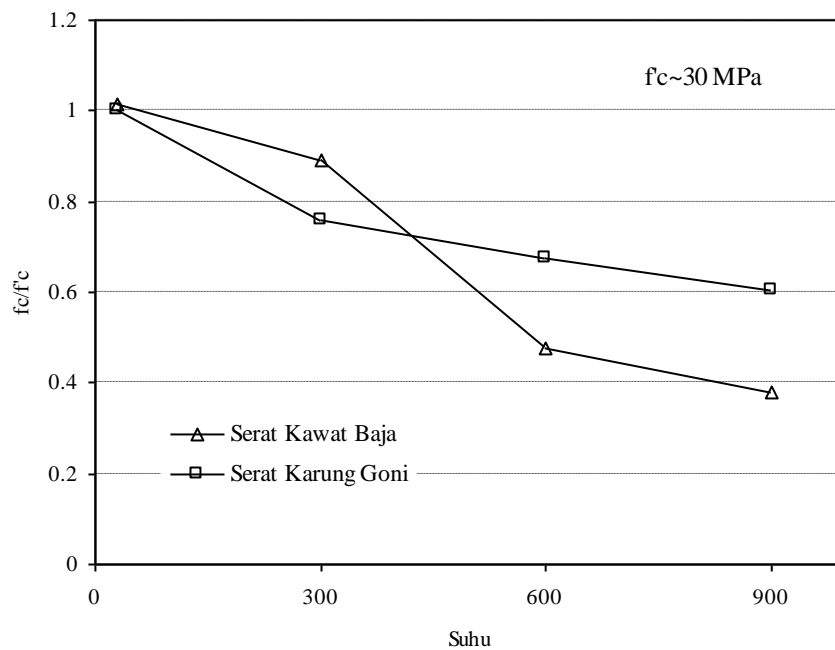
Kuat Tekan Beton Serat Karung Goni Umur 28 hari	Benda uji	Slump rata- rata (mm)	Beban Maksimum dan Kuat Tekan (Umur 120 hari)							
			Spesimen kontrol		Suhu 300°		Suhu 600°		Suhu 900°	
			Pmax. (Ton)	f _c (MPa)	Pmax. (Ton)	f _c (MPa)	Pmax. (Ton)	f _c (MPa)	Pmax. (Ton)	f _c (MPa)
31.3 MPa	1	70	28	33.89	19	24.20	17	21.66	15.3	19.49
	2		26.5	32.07	18.2	23.18	18.1	23.06	14.2	18.09
	3		25.5	30.86	17.5	22.29	16.3	20.76	14.8	18.85
	4		26	31.46	18.8	23.95	16.6	21.15	14.5	18.47
	5		24.5	29.65	19.2	24.46	15.5	19.75	15.1	19.24
	6		25	30.25	19.2	24.46	16.2	20.64	15.2	19.36
	rata-rata		25.92	31.36	18.65	23.76	16.62	21.17	14.85	18.92
52 MPa	1	60	43	52.04	16	20.38	17	21.66	15	19.11
	2		47.5	57.48	19.3	24.59	18.2	23.18	14.4	18.34
	3		44.3	53.61	19.6	24.97	17.6	22.42	14.9	18.98
	4		42.5	51.43	20.6	26.24	17.7	22.55	15.7	20.00
	5		44.5	53.85	24.4	31.08	18.4	23.44	15.8	20.13
	6		40.8	49.38	24.1	30.70	18.1	23.06	16.2	20.64
	rata-rata		43.77	52.97	20.67	26.33	17.83	22.72	15.333	19.53
77.7 MPa	1	40	65	78.66	31	39.49	28	35.67	22	28.03
	2		59.5	72.01	32.3	41.15	27.4	34.90	22.4	28.54
	3		64	77.45	32.1	40.89	26.3	33.50	21.3	27.13
	4		63.5	76.85	31.6	40.25	26.6	33.89	20.6	26.24
	5		65	78.66	30.4	38.73	26.2	33.38	21	26.75
	6		69.5	84.11	31.3	39.87	26.5	33.76	20.5	26.11
	rata-rata		64.42	77.96	31.45	40.06	26.83	34.18	21.3	27.13



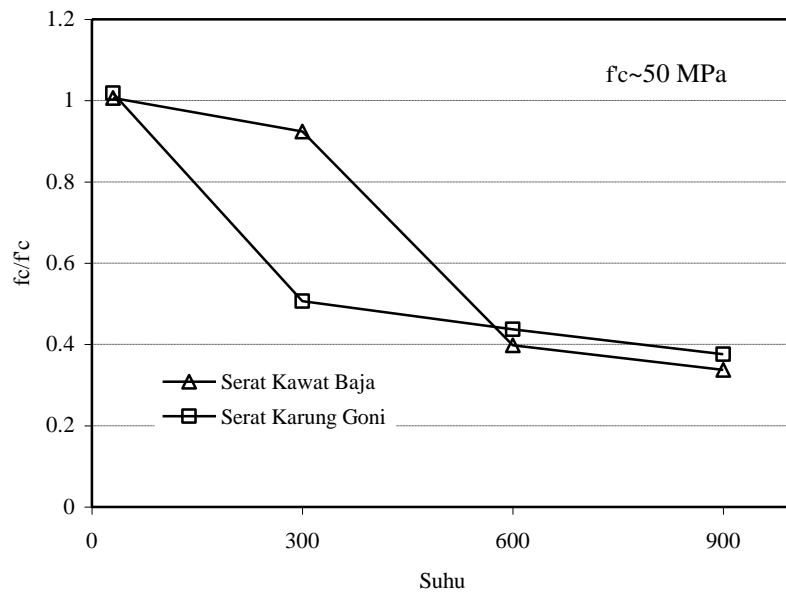
Gambar 4.21. Perubahan kuat tekan beton serat Karung Goni terhadap suhu

4.4. Perbandingan Beton Serat Kawat Baja dengan Serat Karung Goni

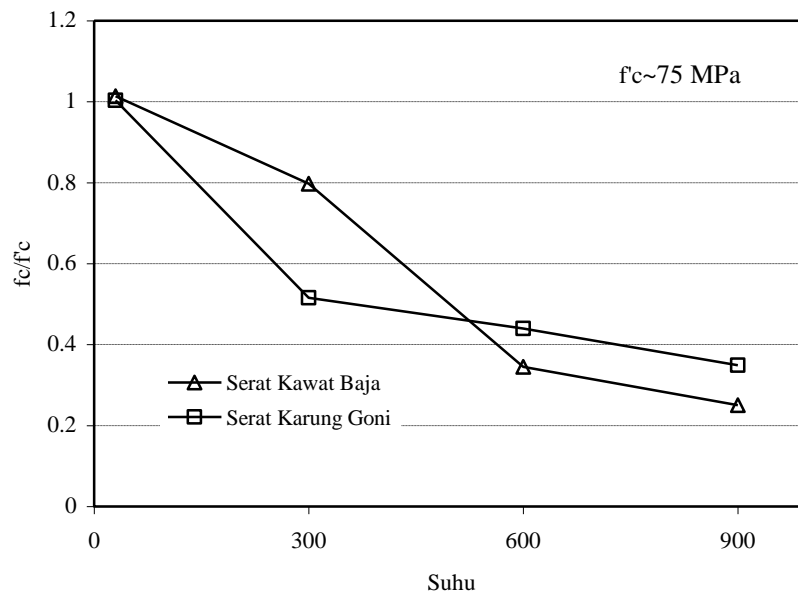
Perbandingan kinerja Beton Serat Kawat Baja dengan Beton Serat Karung Goni diperlihatkan pada gambar 4.22 s/d 4.24.



Gambar 4.22. Perbandingan perubahan kuat tekan beton berserat terhadap suhu; $f_c \sim 30$ MPa



Gambar 4.23. Perbandingan perubahan kuat tekan beton berserat terhadap suhu; $f_c \sim 50$ MPa



Gambar 4.24. Perbandingan perubahan kuat tekan beton berserat terhadap suhu; $f_c \sim 75$ MPa

Pada kuat tekan beton mutu normal ($f_c = 30$ MPa) terlihat bahwa beton serat karung goni lebih baik apabila terbakar pada suhu 300°C . Namun pada kuat tekan beton yang lebih tinggi, beton serat karung goni yang terbakar pada suhu 600°C dan 900°C mengalami penurunan kuat tekan lebih cepat dan berada di bawah kekuatan beton serat kawat baja.

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

1. Beton Serat Kawat Baja maupun Serat Karung Goni dapat dihasilkan dengan desain campuran rencana yang biasa digunakan dalam standar. Komposisi campuran beton dapat diatur sedemikian rupa sesuai dengan target kuat tekan yang diinginkan. Kandungan Serat yang digunakan juga dapat diatur dan disarankan untuk beton dengan mutu yang lebih tinggi untuk menggunakan kandungan Serat sekitar 5% dari volume beton.
2. Sifat workabilitas beton Serat dapat dikontrol dengan baik apabila ditambahkan bahan Water Reducing seperti Superplasticizer ataupun Viscocrete.
3. Penurunan Kuat Tekan Beton Serat Kawat Baja terhadap spesimen Kontrol apabila dibakar pada suhu 300°C belum signifikan, namun apabila dibakar pada suhu 600°C dan 900°C akan terjadi kehilangan kuat tekan sekitar 60% hingga 75%.
4. Hubungan penurunan kuat tekan beton paska bakar terhadap suhu diusulkan sebagai berikut:

$$\frac{f_c}{f'_c} = 1 - 0.0008 T$$

dimana f_c = kuat tekan benda uji (MPa)

f'_c = kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)

T = suhu (dalam °C)

5. Perilaku Kuat tarik (f_t), modulus lentur (f_r), modulus elastisitas (E_c) dan nilai nisbah Poisson (ν) beton Serat Kawat baja paska bakar juga sebanding dengan perilaku kuat tekannya.
6. Sifat Daktilitas beton Serat Kawat Baja paska bakar pada suhu normal dan suhu 300°C relatif tidak berkurang secara berarti baik untuk beton mutu normal, menengah maupun mutu tinggi. Namun pada suhu 600°C dan 900°C seiring dengan kehilangan kekuatan tekan yang sangat signifikan juga mempengaruhi penurunan daktilitas yang memadai.
7. Perbandingan penurunan Kuat Tekan Beton Serat Karung Goni apabila dibakar pada suhu 300°C, 600°C dan 900°C lebih cepat bila dibandingkan sifatnya dengan Beton Serat Kawat Baja.

5.2. Saran

Perilaku mekanik beton Serat pada suhu tinggi ini perlu divalidasi dengan perilakunya terhadap perilaku struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ACI 318-99/ACI 381R-99 (2008); *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*; Am. Concrete Inst., Detroit, Michigan.
- [2] ACI Committee 544 (1993); *Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*; ACI Materials Journal, V.90, No.1, 94-101.
- [3] Antonius and Imran, I. (2012); *Experimental Study of Confined Low, Medium and High-Strength Concrete Subjected to Concentric Compressions*; ITB Journal of Engineering Science, Vol.44, No.3, 252-269.
- [4] Antonius, Indarto, H. and Kurniastuti, D. (2012); *Mechanical Properties of Gunny Sack Fiber Concrete*; Proceeding of 1st International Conf. On Sustainable Civil Eng. Structures and Constr. Materials (SCESCM), Yogyakarta, Indonesia, 11-13 Sept., 172-176.
- [5] Antonius dan Setiyawan, P. (2006); *Kajian Besaran Mekanis Beton Berserat Mutu Tinggi (Studi Eksperimental)*; Jurnal Wahana Teknik Sipil, Politeknik Neg. Semarang, Akreditasi No.49/Dikti/Kep./2003, Vol. 11 No.3, 74-81.
- [6] Antonius, Pratikso, Setiyawan, P. dan Darmayadi, D. (2007); *Perilaku Eksperimental Material dan Struktur Beton Berserat (Fiber Concrete) Mutu Tinggi*; Lap. Penelitian Hibah Bersaing XV Perg. Tinggi Tahun Anggaran 2007, P2M Ditjen Dikti, November.
- [7] ASTM C 39 – 94 (1996), *Test Methode for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Spesimens*; Annual Books of ASTM Standards, USA, 1996.
- [8] ASTM C 78 – 94 (1996), *Test Methode for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*; Annual Books of ASTM Standards, USA, 1996.
- [9] ASTM C 469 – 94 (1996), *Test Methode for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compressio*; Annual Books of ASTM Standards, USA, 1996.
- [10] ASTM C 496 – 94 (1996), *Test Methode for Splittig Tensile Strength of Cylindrical Concrete Spesimens*; Annual Books of ASTM Standards, USA, 1996.
- [11] Badan Standarisasi Nasional (2002); *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Gedung*, SNI-03-2847-2002.
- [12] Bailey, Colin (2002); *Holistic Behaviour of Concrete Buildings in Fire*; Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings 152, August, Issue 3, pp 199-212.
- [13] Bazant, Z.P. and Kaplan, M.F. (1996); *Concrete at High Temperatures; Material Properties and Mathematical Models*, Longman Group Ltd.
- [14] Castillo, C. and Durrani, J.J. (1990); *Effect of Transient High Temperature on High Strength Concrete*, ACI Materials Journal, January-February, pp.47-53.
- [15] Chan, Y.N., Pang, G.F. and Chan, K.W. (1996); *Comparison between High-Strength Concrete and Normal Strength Concrete Subjected to High Temperature*, Materials and Strucures, V.29, December, pp.616-619.
- [16] Chan, Y.N., Peng, G.F. and Anson, M. (1999); *Fire Behavior of High-Performance Concrete Made With Silica Fume at Various Moisture Contents*, ACI Materials Journal, V.96., pp.405-409.
- [17] Chan, Y.N., Peng, G.F. and Anson, M. (1999); *Residual Strength and Pore Structure of High-Strength Concrete and Normal Strength Concrete After Exposure to High Temperatures*, Cement & Concrete Composites, V.21. pp.23-27.
- [18] Cement & Concrete Institute (2010); *Fiber Reinforced Concrete*, The Cement & Concrete Institute, Midrand.
- [19] Kurniastuti, Devita (2011); *Perilaku Mekanik Beton dengan Substitusi Serat Karung Goni*, Tesis Magister, Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro.

- [20] Neville, A.M. (1997); *Properties of Concrete*, Longman, 4th and Final Ed., London.
- [21] Sampebulu, Victor (2012); *Influence of High Temperatures on the Workability of Fresh Ready-Mixed Concrete*, ITB Journal of Eng. Science, V.44B, No.1, pp.21-32.
- [22] Santos, S.O.; Rodrigues, J.P.C.; Toledo, R. and Velasco, R.V. (2009); *Compressive Behaviour at High Temperatures of Fibre Reinforced Concretes*; Acta Polytechnica, V.49, No.1, pp. 29-33.
- [23] Zghair, L.A. Ghani (2011); *Behavior of Plain and High Performance Polypropylene Fiber Concrete Subjected to Elevated Temperatures*, Eng. and Tech. Journal, V.29, No.8, pp.1517-1535.

LAMPIRAN
KEGIATAN EKSPERIMENTAL



Persiapan pengecoran



Penuangan agregat



Proses pengadukan beton



Proses pengadukan beton



Penuangan adukan beton ke cetakan



Penuangan adukan beton ke cetakan



Pengukuran nilai slump



Proses penuangan serat / fiber



Persiapan pembakaran benda di tungku pembakaran