

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Beton Bertulang

Beton bertulang adalah bahan bangunan yang terdiri dari kombinasi antara beton dan baja tulangan. Beton bertulang banyak dipakai sebagai bahan bangunan, dan sangat dominan. Beton bertulang digunakan dengan memadukan sifat-sifat yang dimiliki oleh beton dan baja tulangan yang dapat menghasilkan kekuatan yang tinggi, mempunyai kemampuan yang besar dalam menahan gaya tarik maupun gaya tekan. Beton bertulang awalnya tulangan terdiri dari suatu jaringan batang-batang besi dan berkembang menjadi beton bertulang (Monier, 1867 dalam Indriawan 1999).

Beton untuk beton bertulang merupakan fungsi dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolis (*Portland cement*), agregat kasar, agregat halus, air dan bahan tambah jika diperlukan.

Beton mempunyai kuat tekan yang tinggi membuat beton banyak dipakai sebagai elemen struktur terutama yang memikul gaya tekan, seperti kolom. Sebaliknya, beton relatif mudah retak karena tegangan tariknya lebih kecil bila dibandingkan dengan tegangan tekannya.

Mengatasi keterbatasan ini, pada pertengahan abad sembilan belas, telah didapat kemungkinan, untuk memakai baja dengan kekuatan tariknya yang tinggi untuk memperkuat beton, terutama sekali pada tempat-tempat dimana kekuatan tarik beton yang kecil akan membatasi kapasitas penyangga dari beton. Perkuatan tersebut, biasanya berupa batang baja bundar dengan permukaannya yang sesuai untuk memungkinkan terjadinya proses saling mengikat antara beton dan baja, ditempatkan didalam cetakan sebelum beton diisi kedalamnya. Apabila telah terbungkus sama dengan masa beton yang mengeras, maka perkuatan tersebut akan merupakan bagian yang terpadu dari batang tersebut. Hasil kombinasi dari kedua material tersebut, yang dikenal sebagai beton bertulang, mengkombinasikan banyak keuntungan dari masing-masing material seperti harga yang relatif murah,

kemampuan yang istimewa dari beton untuk dibentuk dan kekuatan tarik yang tinggi serta duktilitas (kelenturan) dan keliatan yang jauh lebih besar dari baja (Winter, 1987 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

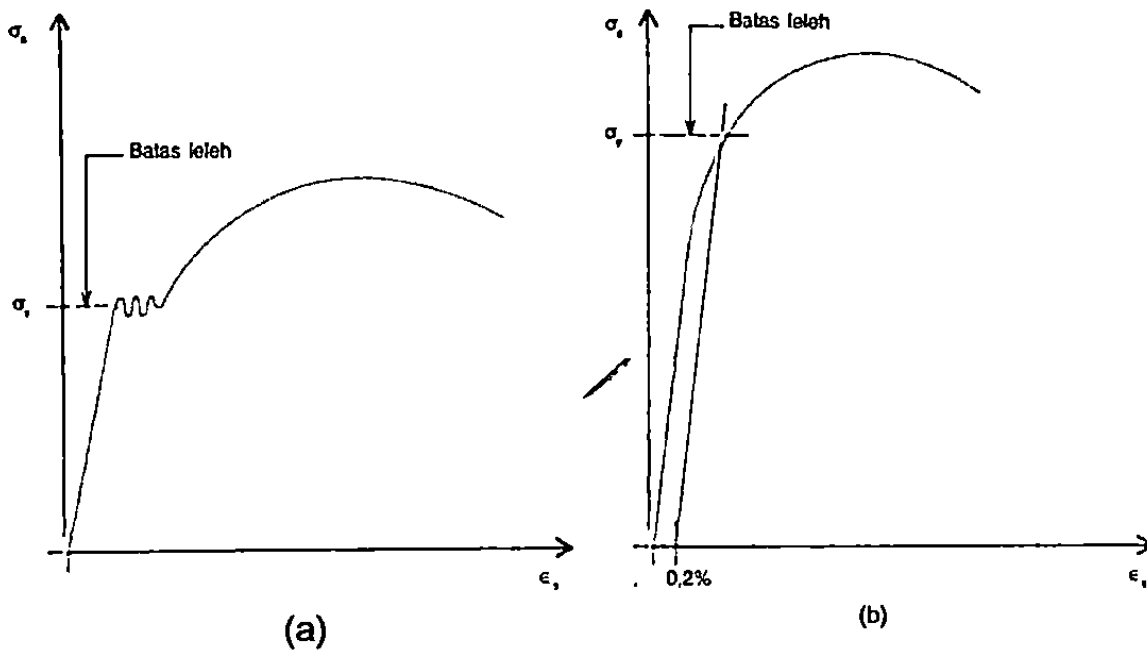
Lekatan yang baik serta kesamaan koefisien muai merupakan suatu alasan utama bahwa, beton dan baja tulangan adalah suatu kombinasi teknis yang baik. Kerja sama kedua material ini, masing-masing melaksanakan fungsi yang paling sesuai yaitu baja melawan tegangan tarik dan beton melawan tegangan tekan. Selanjutnya terdapat juga perlindungan terhadap korosi, serta syarat-syarat kekakuan (keadaan batas lendutan) dan pembatasan lebar celah retakan (keadaan batas retak) mudah dipenuhi.

## **2.2. Baja Tulangan**

Baja banyak digunakan dalam pembuatan struktur atau rangka bangunan dalam bentuk baja profil, baja tulangan beton biasa, anyaman kawat, atau pada akhir-akhir ini di pakai juga dalam bentuk kawat potongan yang disebut “fibre” atau metal fibre, sebagai tulangan beton. Baja terletak diantara besi tuang dan besi tempa. Besi tuang mengandung sejumlah besar karbon dan sangat baik sebagai bagian struktur yang menahan gaya tekan. Besi tempa mempunyai kandungan karbon relatif lebih sedikit dan sangat baik untuk menahan gaya tarik. Baja dapat dipakai untuk bagian struktur yang dapat menahan gaya tarik ataupun gaya tekan. Baja merupakan perpaduan antara besi dan karbon, besi murni tanpa paduan karbon tidak dapat kuat, akan tetapi bila dipadu dengan karbon mempunyai kekuatan yang besar.

Uji tarik pada batang baja tulangan memberikan hasil yang dapat

“ . . . . . ” . . . . . seperti terlihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 (a) Diagram tegangan-regangan bagi baja wais.

(b) Diagram tegangan-regangan bagi baja pengerjaan dingin.

(Kusuma, 1994 dalam Indriawan 1999)

Untuk jenis baja tulangan yang dikerjakan dalam keadaan panas 'hot-rolled' (Gambar 2.1 (a)) berlaku suatu nilai regangan  $\epsilon_s$  tertentu, dengan hubungan antara  $\sigma_s$  dan  $\epsilon_s$  berbentuk linier.

Pada bagian awal diagram tegangan-regangan ini, modulus elastisitas baja  $E_s$  konstan ( $= 2,0 \times 10^5 \text{ MPa} = 2,0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ). Kemudian terdapat bagian horisontal yang dikenal sebagai batas leleh dimana regangan bertambah sedangkan tegangan boleh dikatakan konstan. Tegangan ini disebut *tegangan leleh baja* yang dinyatakan sebagai  $\sigma_y$ .

Setelah terjadi pelelehan, garis kurva naik lagi dan melewati titik maksimum (tegangan ultimat), kemudian turun ke suatu nilai tegangan yang lebih rendah dimana batang akan putus. Bila baja 'hot-rolled' (Gambar 2.1 (b)) mengalami pengerjaan dingin, misalnya dipuntir, maka baja mengalami regangan yang melampaui regangan leleh. Akibatnya sifat baja terhadap tarikan berubah

sampai pada nilai  $a_s$  yang lebih tinggi, dan tidak terdapat suatu titik leleh yang tegas.

Namun pada suatu tegangan dengan regangan 0,2 % yang tetap (off-set 0,2 %) kemudian beban tarik ditiadakan, maka garis diagram akan menurun sejajar dengan garis yang lurus. Tegangan ini disebut *tegangan uji* dan dalam praktek dianggap sebagai batas leleh (*yield point*) yang sebenarnya. Maka tegangan ini dinyatakan dengan simbol  $\sigma_y$ .

Sebuah batang baja tulangan yang tertanam baik dalam beton yang mengeras akan merekat sedemikian rupa, hingga diperlukan gaya yang cukup besar untuk menariknya keluar. Gejala ini disebut *adhesi* atau *lekatan* yang memungkinkan kedua bahan tersebut dapat saling bekerja sama secara struktural. Lagi pula, bila penutup beton cukup padat dan tebal sebagai pelindung tulangan, penutup beton akan melindungi baja tulangan terhadap korosi.

### 2.2.1. Kelebihan dan kekurangan baja

#### 1. Kelebihan baja

Kelebihan logam sebagai bahan konstruksi adalah memiliki sifat yang di suatu pihak lebih baik karena baja : memiliki kuat tarik tinggi, dapat dirubah-rubah bentuknya, mudah disambung/dilas, memiliki harga konduktivitas listrik yang tinggi, konduktivitas panas tinggi dan dapat dihaluskan sehingga berkilau permukaannya.

#### 2. Kekurangan baja

Kelemahan sebagian besar logam, khususnya baja, ialah tidak tahan korosi karena kelembapan maupun oleh pengaruh udara sekeliling dan terjadi perubahan bentuk bila terkena suhu/panas tinggi.

### 2.2.2. Logam Paduan

Baja merupakan besi dengan kadar karbon kurang dari 2 %. Baja dapat

## 1. Baja Karbon

Baja karbon disebut juga plain karbon steel, mengandung terutama unsur karbon dan sedikit silicon, belerang dan pospor. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja karbon dibagi menjadi :

- Baja dengan kadar karbon rendah ( $< 0,2 \% C$ )
- Baja dengan kadar karbon sedang ( $0,1\% - 0,5 \% C$ )
- Baja dengan kadar karbon tinggi ( $> 0,5 \% C$ )

Kadar karbon yang terdapat di dalam baja akan mempengaruhi kuat tarik, kekerasan dan keuletan baja. Semakin tinggi kadar karbonnya, maka kuat tarik dan kekerasan baja semakin meningkat tetapi keuletannya cenderung turun. Penggunaan baja di bidang teknik sipil pada umumnya berupa baja konstruksi atau baja profil, baja tulangan untuk beton dengan kadar karbon  $0,10\% - 0,50\%$ . Selain itu baja karbon juga digunakan untuk baja/kawat pra tekan dengan kadar karbon s/d  $0,90\%$ . Pada bidang teknik sipil sifat yang paling penting adalah kuat tarik dari baja itu sendiri.

## 2. Baja Paduan

Baja dikatakan dipadu jika komposisi unsur-unsur paduannya secara khusus, bukan baja karbon biasa yang terdiri dari unsur silisium dan mangan. Baja paduan semakin banyak digunakan. Unsur yang paling banyak digunakan untuk baja paduan, yaitu : Cr, Mn, Si, Ni, W, Mo, Ti, Al, Cu, Nb, Zr.

### 2.2.3. Sifat-Sifat Fisik dan Mekanis Baja

1. Sifat fisik meliputi : berat, berat jenis, daya hantar panas dan konduktivitas listrik. Baja dapat berubah sifatnya karena adanya pengaruh beban dan panas.
2. Sifat mekanis

Sifat mekanis suatu bahan adalah kemampuan bahan tersebut memberikan perlawanan apabila diberikan beban pada bahan tersebut. Atau dapat dikatakan sifat mekanis adalah kekuatan bahan didalam memikul beban yang berasal dari luar.

Sifat mekanis pada baja meliputi : Kekuatan. Sifat penting pada baja adalah kuat tarik. Pada saat baja diberi beban, maka baja akan cenderung

mengalami deformasi/perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menimbulkan tegangan, yaitu sebesar terjadinya deformasi tiap satuan panjangnya ( $\epsilon$ ). Akibat tegangan tersebut, didalam baja terjadi tegangan/stress sebesar  $\sigma = \frac{P}{A}$ , dimana  $P$  = beban yang membebani baja,  $A$  = luas penampang baja. Pada waktu baja diberi beban, maka terjadi regangan. Pada waktu terjadi regangan awal, dimana baja belum sampai berubah bentuknya dan bila beban yang menyebabkan regangan tadi dilepas, maka baja akan kembali ke bentuk semula. Regangan ini disebut dengan regangan elastis karena sifat bahan masih elastis. Perbandingan antara tegangan dengan regangan dalam keadaan elastis disebut dengan “Modulus Elastisitas/Modulus Young”.

Ada 3 jenis tegangan yang terjadi pada baja, yaitu :

1. Tegangan , dimana baja masih dalam keadaan elastik.
2. Tegangan leleh, dimana baja mulai rusak/leleh.
3. Tegangan plastis, tegangan maksimum baja, dimana baja mencapai kekuatan maksimum.

Keuletan (*ductility*), Kemampuan baja untuk berdeformasi sebelum baja putus. Keuletan ini berhubungan dengan besarnya regangan/strain yang permanen sebelum baja putus. Keuletan ini juga berhubungan dengan sifat dapat dikerjakan pada baja. Cara ujinya berupa uji tarik. Kekerasan, adalah ketahanan baja terhadap besarnya gaya yang dapat menembus permukaan baja. Cara ujinya dengan kekerasan Brinell, Rockwell, ultrasonic, dll. Ketangguhan (*toughness*), adalah hubungan antara jumlah energi yang dapat diserap oleh baja sampai baja tersebut putus. Semakin kecil energi yang diserap oleh baja, maka baja tersebut makin rapuh dan makin kecil

1. Kekerasan : Cara ujinya dengan cara memukul pukulan mendadak

### 2.3. Pengaruh Temperatur pada Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja.

Beton bertulang banyak dipakai selaku unsur konstruksi. Dalam suhu tinggi beton kehilangan kekuatannya sangat banyak dan bila udah mendingin lagi, sisa kekuatannya lebih rendah lagi. Sehingga bagian-bagian beton itu setelah kebakaran perlu mendapatkan tambahan kekuatan. Beton yang dibuat dengan campuran-campuran silikat juga lebih getas dan rapuh dalam kebakaran. Kerapuhan dan kegetasan itu tidak ada dalam konstruksi-konstruksi beton yang memakai yang memakai kapur atau campuran-campuran ringan lainnya. Tetapi ketahanan serta daya dukungnya selalu ditentukan oleh kekuatan tulangnya pada bagian-bagian yang terkena tarikan dan mendapat titik kritisnya pada suhu sekitar 400 °C untuk baja pers dingin dan 550 °C untuk baja gilingan panas. Itu masih tergantung juga dari tebal beton yang menutupi tulangan baja dan yang ternyata sangat penting selaku isolasi panas (Mangunwijaya, 1981 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

Sifat penting dari beton bertulang adalah keawetan yaitu kemampuan untuk menahan bekerjanya pengaruh kimiawi, fisis, mekanis, dan bakteri. Ketahanan beton bertulang terhadap perubahan temperatur (kebakaran) harus diperhatikan karena dari penelitian yang ada memberikan hasil penurunan kekuatan beton maupun baja. Untuk konstruksi beton dipengaruhi oleh ketebalan, berat satuan, jenis agregat, kelembaban, kadar air, ukuran agregat, dan kadar kelembaban agregat pada saat pengadukan. Semakin menurun berat satuan beton dan kadar kelembaban beton meningkat maupun ukuran agregat maksimum yang digunakan semakin kecil secara umum akan memberikan hasil ketahanan terhadap kebakaran akan semakin meningkat (Mark, 1987 dalam Indriawan 1999).

Pengaruh temperatur untuk konstruksi bangunan pada umumnya ditinjau

dilihat dari segi pengaruhnya terhadap struktur secara langsung. Sedangkan

tingkat tahan api untuk berbagai jenis konstruksi ditentukan oleh peraturan-peraturan bangunan dan biasanya dinyatakan dalam kelipatan waktu setengah jam.

Definisi tahan api merupakan sifat suatu bahan atau rakitan konstruksi bertahan terhadap kebakaran atau yang melindungi bahan sehingga tidak terbakar, ASTM E 176 dalam Mark (1987). Menurut Muto (1990), peraturan untuk perkantoran diperlukan waktu ketahanan terhadap api selama 1,5 jam untuk struktur di atas permukaan tanah, sedang untuk bagian di bawah tanah diperlukan ketahanan selama 2 jam. Di Jepang persyaratan ketahanan terhadap api bervariasi dari 30 menit sampai 3 jam sesuai jenis struktur dan lokasinya. Tingkat tahan api (*Fire Rating*) untuk berbagai jenis konstruksi didasarkan pada ketahanan terhadap kebakaran, menurut ASTM E 119 dalam Mark (1987), tingkat tahan api dinyatakan dalam satuan jam seperti ditunjukkan dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1 Persyaratan tingkat tahan api tipikal dalam beberapa peraturan bangunan

Elemen Struktural	Jenis Konstruksi			Peraturan yang digunakan*
	Sifat Tahan Api Tertinggi	Sifat Tahan ke-2 Api Tertinggi	Tidak Nyala Tertinggi	
Kolom yang menyangga lebih dari satu lantai	4 jam	4 jam	4 jam	Basic Standard Uniform
	4 jam	4 jam	4 jam	
	3 jam	3 jam	3 jam	
Balok Induk, Balok dan Rangka Batang	4 jam	4 jam	4 jam	Basic Standard Uniform
	4 jam	4 jam	4 jam	
	3 jam	3 jam	3 jam	
Lantai	3 jam	3 jam	3 jam	Basic Standard Uniform
	2 jam	2 jam	2 jam	
	2 jam	2 jam	2 jam	
Atap	2 jam	2 jam	2 jam	Basic Standard Uniform
	1,5 jam	1,5 jam	1,5 jam	
	2 jam	2 jam	2 jam	

\*Basic : Basic Building Code dikeluarkan oleh Building and Code Administrators International Inc.

\*Standard : Standard Building Code dikeluarkan oleh Southern Building Code Congress.

\*Uniform : Uniform Building Code dikeluarkan oleh International Conference of Officials.

Menurut Addleson (1976) dalam Indriawan 1999, kebakaran pada bangunan, api berkembang menurut tiga periode yang disebut periode



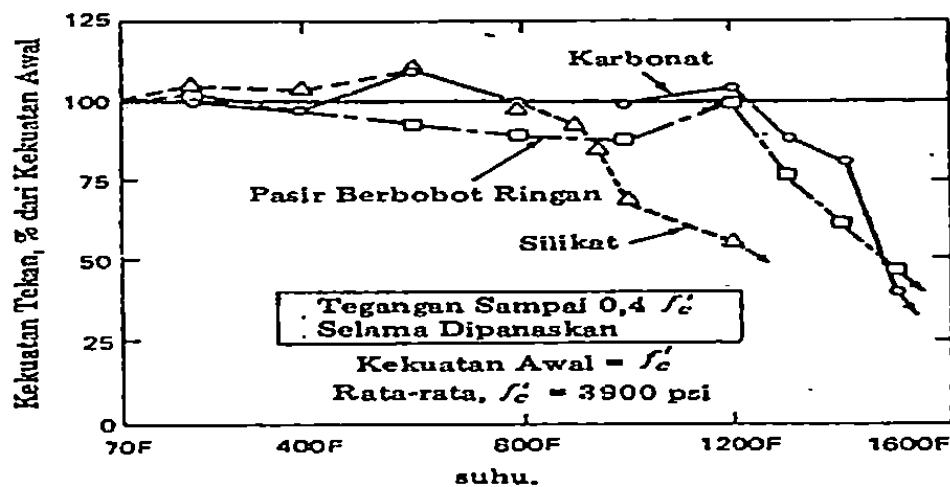
periode menghilang (*Decay*). Pada periode pertumbuhan biasanya suhu yang timbul masih rendah, jarang melebihi 250 °C, selain itu kerusakan yang ditimbulkan pada struktur tidak berarti. Periode pembakaran tetap, suhu meningkat dengan cepat dan dapat mencapai 1000 °C, tergantung jenis dan banyaknya bahan yang dapat terbakar. Periode menghilang dimulai jika seluruh bahan yang sudah terbakar dan mulai terurai secara kimiawi.

Deformasi akibat panas (*Thermal Deformation*), ditentukan oleh beberapa faktor seperti jenis agregat, kecepatan panas dan tingkat pembebanan. Sifat panas sangat mempengaruhi deformasi tersebut, kemampuan suatu bahan untuk dapat menerima panas (*Thermal Conductivity*) sangat membantu dalam pengurangan deformasi. *Thermal Conductivity* beton sebagai selimut dari tulangan ditentukan oleh beberapa faktor yaitu : jenis agregat, porositas beton, dan kadar kelembaban. Peningkatan suhu beton menyebabkan keluarnya air yang masih terkandung didalam pori-pori beton. Maka yang dimaksud *Thermal Conductivity* adalah untuk kondisi beton yang sudah kering. *Thermal Conductivity* untuk berbagai jenis beton sangat berbeda.

Menurut Wisconsin State Building Code dalam Mark dalam Indriawan (1999), menurunkan persyaratan terhadap kebakaran yang ditentukan oleh pengaliran panas (yaitu kenaikan 250 °F), untuk konstruksi beton kenaikan suhu tergantung pada ketebalan dan berat satuan beton, dapat juga dipengaruhi oleh jenis agregat, kondisi kelembaban beton, kadar air, ukuran agregat maksimum, dan kadar kelembaban agregat pada saat pengadukan.

Menurut Mark dalam Indriawan (1999), sifat beton pada suhu tinggi dipengaruhi dalam batas-batas tertentu oleh jenis agregat. Kebanyakan beton struktural dapat digolongkan dalam tiga jenis agregat; karbonat, silikat, dan berbobot ringan. Agregat karbonat meliputi batu kapur dan dolomit, mengalami perubahan kimia pada suhu antara 1300 °F sampai 1800 °F. Agregat silikat meliputi granit, kuarsit, batu pasir, dan bahan lain yang mengandung silikat, mengalami perubahan kimia pada suhu 1060 °F. Agregat berbobot ringan meliputi batu karang, tanah liat, batu apung, mengalami perubahan pada suhu 1900 °F

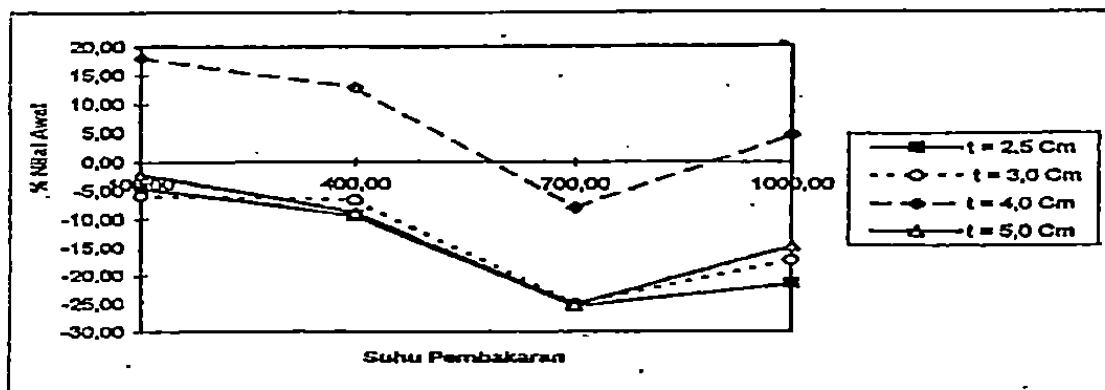
tinggi. Data ini menunjukkan kekuatan benda uji beton yang mengalami tegangan sampai 40 % dari kekuatan tekannya selama dipanasi. Kekuatan beton dengan agregat karbonat dan agregat berbobot ringan pada suhu 1200 °F sedikit naik. Sebaliknya, kekuatan beton dengan agregat silikat menurun ± 55 % pada suhu 1200 °F.



Gambar 2.2 Kuat tekan beton pada temperatur tinggi

(Mark dalam Indriawan 1999)

Menurut Nugroho (1998), akibat pembakaran pada beton bertulang dengan selimut bervariasi pada umumnya tegangan leleh baja tulangan menurun dibandingkan tegangan awal mulai dari suhu 100 °C yaitu ± 5 %, pada suhu 400 °C turun ± 10 %, suhu 700 °C turun + 25 %, sedangkan pada suhu 1000 °C hanya turun + 20 %, dan dapat digambarkan nilai penurunan dari tiap-tiap selimut seperti pada gambar 2.3.

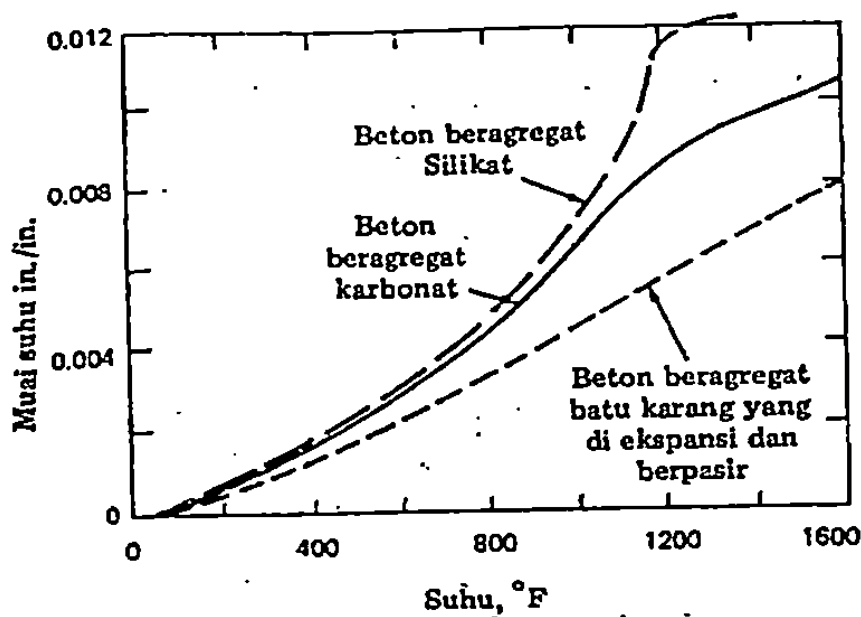


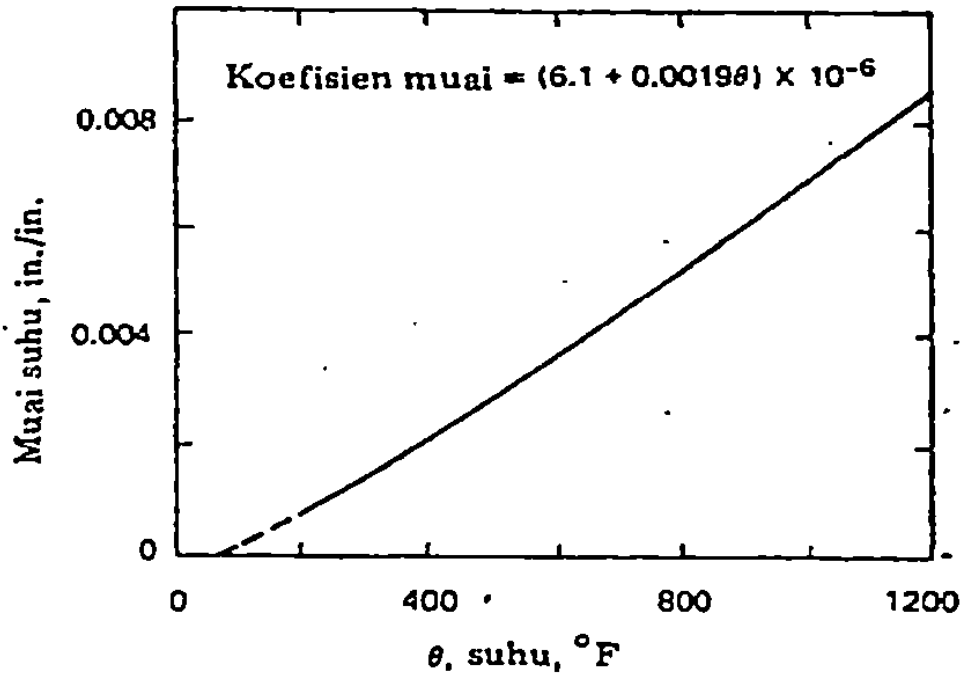
Gambar 2.3 Prosentase perubahan nilai tegangan leleh pada berbagai suhu dengan

(Mark dalam Indriawan 1999)

Ditinjau dari selimut beton setebal 2,5 cm sampai 5 cm didapatkan kekuatan optimal pada selimut 4 cm (kekuatan tegangan lebih besar pada pasca bakar) dibandingkan selimut beton yang lainnya.

Menurut Djokowahjono (1997), akibat kenaikan temperatur beton mengalami pengurangan berat, akibat menguapnya air dalam beton dan juga luas permukaan beton yang terkena langsung pembakaran, dengan semakin naiknya temperatur semakin tinggi prosentase pengurangan berat. Dengan adanya perubahan temperatur yang diimbangi dengan terjadinya deformasi, untuk tiap bahan sangat berbeda. Untuk beton deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh koefisien muai yang dimiliki oleh beton. Koefisien muai ini sangat mempengaruhi pelekatan antara beton dan baja tulangan pada sistem beton bertulang. Kegagalan pelekatan dalam beton bertulang akibat perbedaan pemuaian antara kedua bahan sangat kecil, dapat dikatakan koefisien muai panas hampir sama sehingga tidak ada permasalahan dalam hal pelekatan. Nilai koefisien muai suhu yang dimiliki oleh beton dan baja tulangan dapat dilihat pada gambar 2.4 dan gambar 2.5.

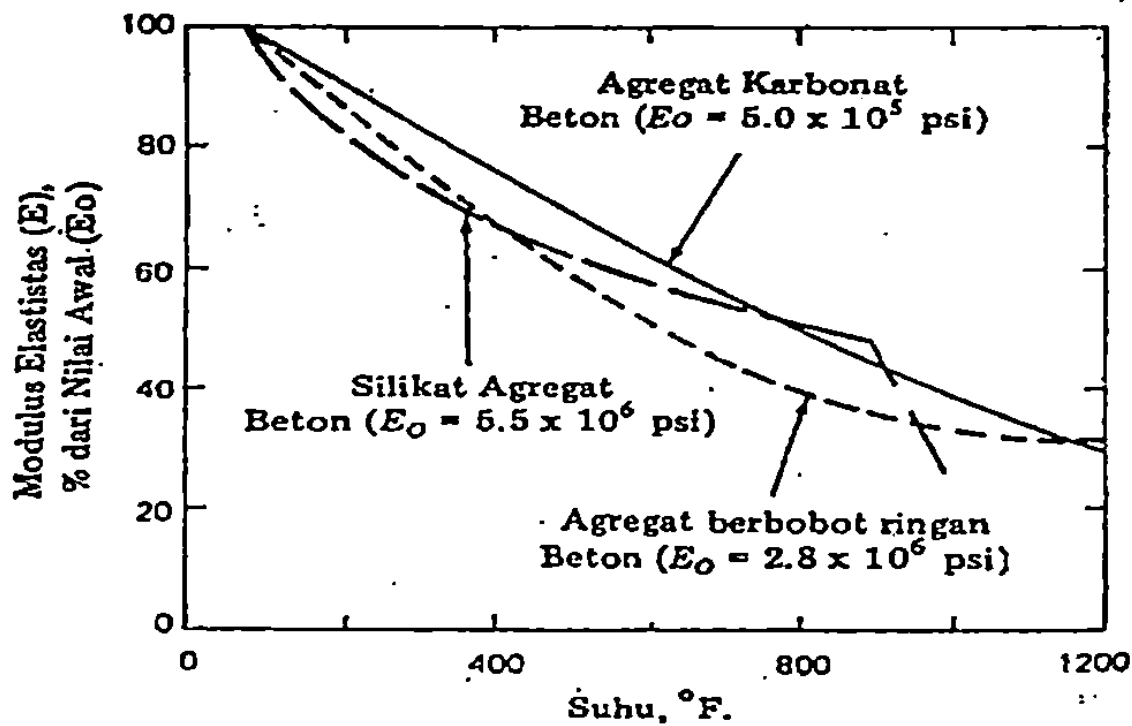




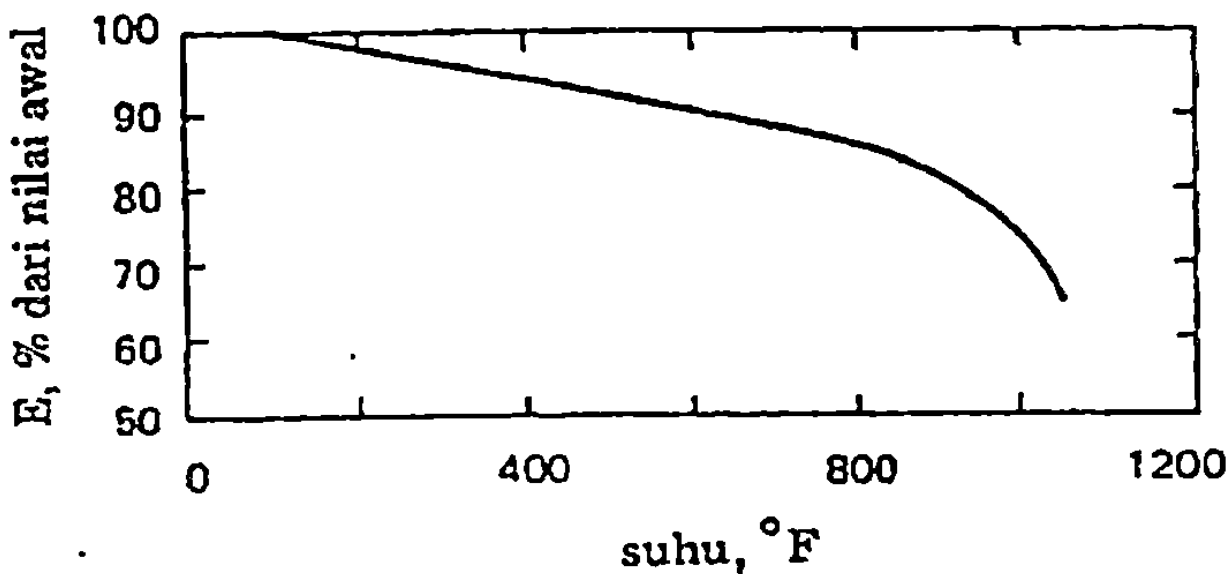
Gambar 2.5 Koefisien muai suhu baja tulangan (Mark dalam Indriawan 1999).

Perubahan temperatur pada beton dapat mengakibatkan retak-retak pada beton. Retak tersebut diakibatkan terjadinya penyusutan pada beton, susut dapat diakibatkan oleh kebakaran maupun oleh panas hidrasi. Susut akibat panas hidrasi terjadi ketika adukan beton dibuat, selama umur beton akan terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan terjadinya susut.

Hansen (1976), akibat perubahan temperatur akan terjadi perubahan kimia dan fisika, beton akan rusak jika dipanaskan secara berulang pada suhu 400 °C. Nilai modulus elastis turun 25 % pada suhu 500 °F dan turun 50 % pada suhu 800 °F. Untuk baja tulangan nilai modulus elastis akibat pengaruh temperatur menjadi berkurang. Nilai modulus elastis baja tulangan menjadi + 90 % pada saat temperatur mencapai 600 °F, pada temperatur + 750° C baja tulangan akan melebur. Perubahan nilai modulus elastisitas beton dan baja tulangan dalam Fintel



Gambar 2.6 Hubungan modulus elastik beton dengan perubahan temperatur  
(Mark 1987 dalam Indriawan 1999)



Gambar 2.7 Hubungan modulus elastik baja tulangan dengan perubahan

Besar konversi Fahrenheit dalam Celcius dirumuskan dengan :

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = 5/9 \times (T \text{ } ^\circ\text{F} - 32^\circ) \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

$T \text{ } ^\circ\text{C}$  = Suhu pada  $^\circ\text{C}$

$T \text{ } ^\circ\text{F}$  = Suhu pada  $^\circ\text{F}$

Surahman (1998) dalam Indriawan 1999, telah meneliti sifat bahan secara struktural pasca bakar berupa kekuatan (dinyatakan dengan tegangan leleh) dan kekakuan (dinyatakan dengan modulus elastisitas). Bahan bangunan tersebut berupa beton dan baja yang mengalami perubahan seperti pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat bahan untuk berbagai suhu

Suhu	Kekuatan Beton	Kekuatan Beton	Kekuatan Baja	Kekuatan Baja	Kuat Lekat Tulangan
25 $^\circ\text{C}$	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
200 $^\circ\text{C}$	95 %	90 %	95 %	93 %	70 %
400 $^\circ\text{C}$	60 %	55 %	55 %	65 %	25 %
600 $^\circ\text{C}$	20 %	35 %	15 %	28 %	0 %

Akibat perubahan temperatur dengan tingkat permasalahan yang berbeda menyebabkan setiap bahan yang terbakar mengalami penurunan nilai kekuatan, dari tinjauan pustaka di atas, kekuatan beton dan baja tulangan menurun akibat perubahan temperatur. Pada penelitian ini akan dikaji sejauh mana penurunan baja tulangan, apabila baja tulangan dalam beton bertulang dibakar dengan temperatur dan lama pembakaran yang berbeda dengan dilindungi selimut beton yang berbeda pula.

### 2.3.1. Sifat pasta semen pada kenaikan temperatur

Ketika pasta semen dipanaskan mulai temperatur ruangan sampai 100  $^\circ\text{C}$ , maka kekuatannya akan bertambah sedikit karena hilangnya air bebas pada bagian arang (*clinker*) yang terhidrasi, kemudian menyerap air, dan kira-kira pada

temperatur 300 °C air yang terikat secara kimiawi akan hilang pula. Kekuatan pasta semen pada temperatur 400 °C hampir sama kekuatannya pada temperatur ruangan. Diantara temperatur 400 °C sampai 600 °C kalsium hidroksida mengalami dehidrasi dan berubah menjadi kalsium oksida yang kekuatannya menjadi rendah sekali atau bahkan tidak mempunyai kekuatan sama sekali, yang akhirnya menyebabkan kekuatan pasta semen berkurang dengan cepat sepanjang interval temperatur tersebut. Pada temperatur 600 °C sampai 700 °C hasil pengeringan lainnya menyebabkan kehancuran dan kekuatan pasta semen hilang sama sekali. Setelah didinginkan dari temperatur 400 °C sampai 500 °C keretakan yang besar terbentuk pada pasta semen. Retak-retak juga disebabkan oleh pemuaian volume kalsium oksida pada temperatur tinggi hasil dehidrasi kalsium hidroksida. Perubahan kimia pasta semen pada temperatur tinggi juga disertai dengan perubahan volume. Ketika dipanaskan dari temperatur ruangan ke 100 °C, pemuaian volume pasta semen meningkat secara linier, kemudian terjadi penyusutan sampai temperatur 500 °C dehidrasi. Pada temperatur tinggi, volume kembali meningkat tanpa dapat mencapai nilai aslinya. Dua efek pasta semen pada temperatur tinggi adalah hilangnya kekuatan akibat pembusukan dari kalium hidroksida dan hasil pengeringan lainnya saat temperatur 400 °C, pemuaian terjadi antara 100 °C sampai 400 °C akibat ketidaksesuaian antara perubahan volume agregat, yang dapat meningkatkan keretakan dan kehancuran beton (Hansen, 1976 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

### 2.3.2. Sifat agregat pada kenaikan temperatur

Agregat berbeda reaksinya pada temperatur tinggi tergantung pada struktur dan komposisi mineralnya. Batu koral dibedakan oleh pembungkus padat dari bermacam-macam mineral yang berbeda panasnya. Kristal secara mandiri mempunyai perbedaan tujuan dan arah, walaupun tekanan dalam berkembang pada kenaikan temperatur yang menyebabkan pelepasan penuh partikel.

Sifat fisik dari batuan sedimen tergantung pada kandungan airnya. Kekuatan *sandstone* batuan hanya setengah dari kekuatan material kering. Batu pasir memuai ketika dipanaskan. Jika temperatur naik secara cepat, pemuaian ini

menyebabkan keretakan pada beton. Pada kenaikan yang rendah sekitar temperatur 100 °C batu pasir lebih menyerap air dan mengembang, hal ini menyebabkan gagalnya perletakan dan kekuatan beton berkurang. Flint, yang sering ditemukan dalam batuan sedimen mengandung sedikit air di dalam pori-pori mikroskopisnya. Ketika air menguap pada suhu 300 °C, berkurangnya tekanan uap menyebabkan keretakan pada beton. Batu kapur mempunyai daya tahan yang baik terhadap panas sejauh tidak terjadi perubahan komposisi atau perubahan volume yang mendadak. Pada temperatur 650 °C senyawa kimianya adalah kalsium oksida dan karbon oksida. Ketika didinginkan, kalium oksida bereaksi dengan air membentuk kalsium hidroksida dibawah pemuatan dan keretakan beton. Pada temperatur 400 °C pasta semen secara cepat menjadi buruk, secara perlahan ikatan semen-agregat menjadi hilang, kekuatan beton hilang dan beton tidak dapat dipergunakan untuk keperluan praktis. Batuan alam yang mempunyai kandungan feldspar tinggi, seperti basalt, andesite, diabase, dan agregat buatan yang terbuat dari slag, lempung bakar atau hasil pabrik lainnya adalah material yang cocok untuk beton yang dipakai untuk temperatur 300°C (Hansen, 1976 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

### **2.3.3. Keretakan beton pada kenaikan temperatur**

Pengaruh kenaikan temperatur pada peristiwa kebakaran sangat dan cukup serius pada beton yang tidak terlindung, telah diketahui bahwa pada temperatur di atas 100 °C, pasta semen mengalami susut karena peristiwa dehidrasi, sedangkan butiran agregat mengembang karena meneruskan muai panasnya. Peristiwa ini dapat merupakan penyebab keretakan pada beton. Selain itu kemungkinan terjadinya retak pada beton dapat pula disebabkan oleh kombinasi antara kenaikan tegangan dan tekanan uap panas dari dalam pada saat beton dipanasi dengan cepat seperti pada peristiwa kebakaran. Pada saat terjadi kebakaran, kenaikan temperatur sangat besar dan beton yang terbakar akan sulit mengeluarkan uap air dari semen gel yang terkandung didalamnya, mengingat beton berifat padat. Hal ini mengakibatkan terjadinya tekanan udara panas di



dalam yang akan membentuk rongga-rongga yang dapat menimbulkan keretakan pada beton.

Permukaan beton biasanya mudah hancur karena bagian ini mengalami kenaikan volume udara yang besar dan berlangsung cepat. Sebagian tegangannya digunakan untuk perlawanan terhadap gerakan panas yang menembus lapis permukaan beton tersebut.

Pada saat terjadinya kenaikan temperatur, gerakan panas pada beton merupakan hal yang sangat sulit diperkirakan. Hal ini tergantung pada sifat pasta semen maupun agregat yang digunakan. Pada kisaran temperatur tertentu, agregat mengembang karena memuai, sedang pasta semen menyusut karena dehidrasi (Hansen, 1976 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

#### **2.3.4. Pengaruh tempertur pada kekuatan beton**

Hasil penelitian Neville menunjukkan bahwa kenaikan temperatur cenderung mengakibatkan penurunan kuat tekan beton. Diduga ada sedikit kenaikan kuat tekan pada temperatur 200 °C sampai 300 °C, tetapi kuat tekan pada temperatur 400 °C tidak lebih dari 80 % kuat desak normalnya, dan kuat desak pada temperatur 700 °C tidak lebih dari 30 % kuat tekan normalnya. Reaksi kimia dan reaksi fisika pada beton yang berlangsung selama pemanasan. Perubahan fakto air semen sedikit pengaruhnya terhadap kuat desak beton pada kenaikan temperatur. Meskipun demikian, penurunan kuat tekan beton pada kenaikan temperatur akan berkurang jika kandungan semen dikurangi (Hansen, 1976 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

Hasil penelitian yang dilakukan Riswanto pada beton bertulang dengan tipe K250 dan K300 yang dibandingkan dengan spesimen normal dengan tulangan 7,5 mm dan tebal selimut beton 2 cm pada temperatur 1000 °C selama 10 jam memberi hasil untuk tegangan patah pada spesimen normal sebesar 55,25 kg/mm<sup>2</sup> untuk K250 sebesar 46,15 kg/mm<sup>2</sup> atau penurunan sebesar 16,47 % dan K300

Menurut Nugraha dan Antoni (2007), pengaruh temperatur tinggi terhadap beton adalah :

- Pada 100 °C → air kapiler menguap.
- Pada 200 °C → air yang terserap di dalam agregat mulai menguap.  
Penguapan menyebabkan penyusutan pasta.
- Pada suhu 400 °C, pasta semen yang sudah terhidrasi terurai kembali sehingga kekuatan beton mulai terganggu.  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

Walaupun demikian beton yang di bawah pembebanan lebih kuat dari pada yang tidak dibebani. Pada temperatur 600 °C di bawah beban 0,4 *fc'* tidak mengalami penurunan kekuatan.

### 2.3.5. Sifat baja pada kenaikan temperatur tinggi

Daya tahan baja terhadap api dari tulangan yang tidak terlindung diperlemah oleh konduktivitasnya yang tinggi terhadap panas dan oleh kenyataan bahwa kekuatan tulangan akan berkurang banyak pada temperatur yang tinggi (Winter,1987 dalam Ibadilhaq dan Jauhari, 1998).

Proses perlakuan panas terhadap baja pada umumnya akan mempengaruhi transformasi atau dekomposisi struktur atom. Struktur dan bentuk dari hasil transformasi/dekomposisi unsur inilah yang akan menentukan sifat fisik dan mekanik baja yang mengalami proses perlakuan panas itu. proses perlakuan panas pada dasarnya terdiri dari beberapa tahapan, dimulai dengan pemanasan sampai ke temperature tertentu, lalu diikuti dengan penahanan selama beberapa saat, baru dilakukan pendinginan dengan kecepatan tertentu. Tidak semua atom-atom mampu berdifusi pada saat transformasi fase pendinginan berlangsung. Atom-atom tersebut akan membentuk gugusan kristal yang terpisah sehingga menimbulkan reduksi pada luas penampang awal (Suwanda,2003).

- Pada 300 °C → Baja kehilangan 25 % dari kekuatannya.
- Pada 500 °C → Baja kehilangan 65 % dari kekuatannya.
- Pada 675 °C → Baja kehilangan 75 % dari kekuatannya.