

G91
BAY
P 4



**PERUBAHAN PERILAKU MEKANIS BETON
AKIBAT TEMPERATUR TINGGI**

TESIS

Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Olch

Trisni Bayuasri

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2005**

PERUBAHAN PERILAKU MEKANIS BETON AKIBAT TEMPERATUR TINGGI

Disusun Oleh

Trisni Bayuasri

NIM : L4A.003.037

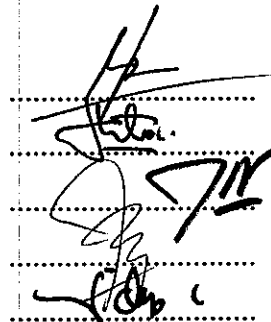
Dipertahankan di depan Tim Penguji pada Tanggal :

25 Februari 2005

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Tim Penguji :

- | | |
|----------------------------|--------------|
| 1. Ir. Himawan Indarto, MS | (Ketua) |
| 2. Dr. Ir. Antonius, MT | (Sekretaris) |
| 3. Ir. Purwanto, MS | (Anggota 1) |
| 4. Dr. Ir. Nuroji, MT | (Anggota 2) |
| 5. Ir. Windu Partono, MSc | (Anggota 3) |



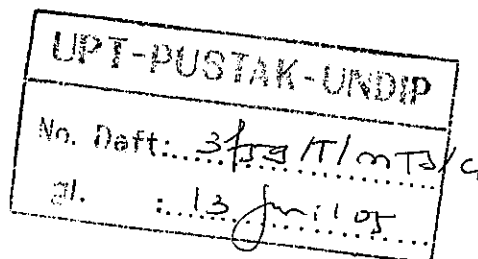
Semarang, Maret 2005

Universitas Diponegoro
Program Pascasarjana
Magister Teknik Sipil

Ketua,



Dr. Ir. Suripin, M.Eng
NIP. 131 668 511



ABSTRAK

Beton merupakan material bangunan yang memiliki ketahanan terhadap panas/api yang lebih baik dibandingkan dengan jenis material yang lain. Hal ini disebabkan beton memiliki konduktivitas panas yang lemah. Namun beton tetap saja memiliki keterbatasan, sehingga jika terkena panas yang terlalu tinggi dalam waktu yang cukup lama maka tetap mengalami kerusakan. Tingkat kerusakan yang terjadi disebabkan oleh banyak hal misalnya karena pencapaian suhu yang diterima beton, lamanya beton terkena api, ataupun karena mutu beton yang berbeda.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton paska beton terbakar pada berbagai macam temperatur dan lama waktu beton terbakar. Oleh karena itu dilakukan pembakaran beton pada suhu 300°C, 600°C, dan 900°C untuk masing-masing suhu selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam. Dari variasi suhu pembakaran dan lama waktu pembakaran sehingga dihasilkan grafik perubahan kuat tekan dan modulus elastisitas beton. Adanya regresi pada grafik tidak membatasi suhu ataupun waktu yang diinginkan, sesuai dengan penelitian. Digunakannya dua macam kuat tekan beton, yaitu K225 dan K350 agar bisa diketahui perilakunya terhadap temperatur tinggi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perilaku kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton paska pembakaran adalah sama, yaitu mengalami penurunan. Tingkat penurunan yang terjadi dipengaruhi oleh pencapaian suhu dan waktu. Semakin suhu tinggi dalam waktu yang lama, maka kekuatan sisanya pun semakin kecil. Misal pembakaran pada suhu 300°C selama 3 jam, sisa kuat tekan beton $\pm 71,8\%$, dan untuk waktu 9 jam menjadi $\pm 60,04\%$. Prosentase perubahan kuat tekan beton maupun modulus elastisitas beton untuk kuat tekan beton yang berbeda mengalami perbedaan meskipun dibakar pada suhu dan waktu yang sama. Misal untuk suhu 600°C waktu 5 jam, pada kuat tekan beton K225 kekuatan sisanya $\pm 36,40\%$, sedangkan pada K350 kekuatan sisanya $\pm 24,46\%$.

ABSTRACT

Fire resistance of concrete as building material is better than other material. It is caused by the thermal conductivity of concrete is low. However, concrete still has limitation. When the concrete is experienced to the height temperature for a long of time, it will be damaged. The degree of damage is depended on various factors, such as the degree of temperature, duration of fired, or the concrete quality.

This research is assumed to find out the change of concrete strength and modulus elasticity of the concrete after fired at various temperature and duration. Two different concrete strength, K225 and K350, are tested in this research. Both are fired at the temperature of 300°C, 600°C, and 900°C at the duration of 3 hours, 5 hours, and 7 hours.

Result of this research indicated that the behaviour strength of concrete and modulus elasticity of concrete after fired is equal, that is decreasing. The degree of degradation is influenced by temperature achieved and duration. The higher the temperature are the longer the duration, the rest of the strength tend to be smaller. For example, the fired at temperature 300°C during 3 hours, the rest of the strength concrete $\pm 71,8 \%$, and for duration 9 hours become $\pm 60,04\%$. The change of the strength of concrete and also modulus elasticity of concrete for different concrete quality are different although they are burned at the same temperature and duration. For example at temperature 600°C for 5 hours duration, strength of concrete K225 of the rest strength $\pm 36,40\%$, while K350 of the rest strength $\pm 24,46 \%$.

"Penerimaan tidak berarti menyerah atau berhenti berharap, penerimaan berarti menyerahkan semuanya – harapan, duka cita, kecemasan – kepada Tuhan. Terimalah hidupmu, dengan liku-likunya. Petualangan justru terletak pada saat perjalanan, bukan pada saat tiba."

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa sehingga terselesaikannya tesis dengan judul **"Perubahan Perilaku Mekanis Beton Akibat Temperatur Tinggi"**. Penulisan tesis ini merupakan salah satu syarat akademis dalam menyelesaikan program Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang.

Atas segala bimbingan baik langsung maupun tidak langsung dan bantuan moril maupun materiil yang penulis dapatkan sejak awal hingga akhir, penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. Ir. Suripin, M.Eng, selaku ketua program studi Magister Teknik Sipil yang membantu dalam proses kelancaran tesis.
2. Ir. Budi Hermanto, selaku General Manajer PT Jaya Readymix yang memberikan kemudahan penulis dalam menyelesaikan tesis.
3. Ir. Prabowo S, MT, selaku Kepala Laboratorium Bahan Bangunan Fakultas Teknik Jurusan Sipil - UNISSULLA
4. Suharyadi, selaku Pengelola Krematorium di Kedungmundu, yang membantu dalam proses kelancaran tesis.
5. Agus Maryoto, ST, MT, Prasetyo Adhi Chrisnarmoko, dan teknisi-teknisi Jayamix yang membantu proses pelaksanaan tesis.
6. Djumadi dan petugas-petugas krematorium kedungmundu, yang membantu proses pelaksanaan tesis.
7. Seluruh tenaga administrasi Magister Teknik Sipil UNDIP yang membantu dalam proses penyelesaian tesis.
8. Kedua Orang tua, Drs. Tarsisius Tarmudji dan Athanasia Rusmini, Kedua Kakak dan Kakak Ipar, Trisni Wulandari Veronika, SE, MM, dan Pramudito, ST, Trisni Suryarini Maria, SE. Akt, MSi. Akt, dan Paulus Riyanto SE. Akt, MSi. Akt, dan Ekantallo Rinaryanto, ST yang tidak pernah berhenti menemani dan memberikan dukungan dalam banyak hal terutama doanya.
9. Untuk seluruh teman, terutama kelas Struktur Angkatan II
Khusus kepada Ir. Himawan Indarto, MS dan Dr. Ir. Antonius, MT, selaku dosen pembimbing, penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sedalam-dalamnya atas petunjuk dan bimbingan yang diberikan sejak awal hingga akhir penyusunan tesis ini.

Tesis ini merupakan penerapan ilmu yang penyusun peroleh selama di bangku kuliah. Tidak lupa juga selama penyusunan tesis ini penulis juga dibantu dari berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu dan buku literatur serta catatan kuliah yang ada untuk menjadi semakin lengkap apa yang penulis peroleh selama di bangku kuliah.

Mengingat waktu penyelesaian dan keterbatasan ilmu penulis, maka penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya, dan mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi kesempurnaan hasil akhir dari tesis ini.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa akan membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan pada penulis.

Semarang, Februari 2005

Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAKSI	iii
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMBANG	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	1
1.3 Manfaat Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	2
1.5 Sasaran Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Perilaku Beton Terhadap Api.....	4
2.2 Sifat Termal Agregat.....	6
2.3 Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton pada Temperatur Tinggi dan Ketahanannya Terhadap Api.....	7
2.3.1 Kuat Tekan Beton pada Temperatur Tinggi.....	7
2.3.2 Modulus Elastisitas pada Temperatur Tinggi	9
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Umum.....	11
3.2 Program Eksperimental.....	11
3.2.1 Parameter Pengujian.....	11
3.2.2 Peralatan Eksperimental.....	11
3.3 Pembuatan Benda Uji.....	15

3.3.1 Bahan Dasar Pembentuk Beton.....	15
3.3.2 Spesifikasi Benda Uji.....	16
3.3.3 Desain Campuran.....	17
3.4 Perawatan Benda Uji.....	17
3.5 Pemanasan Benda Uji.....	17
3.6 Pengujian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton.....	17
3.7 Bagan Alir.....	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Umum.....	20
4.2 Hasil Mix Desain.....	21
4.3 Hasil Pembakaran.....	22
4.3.1 Pengamatan Visual.....	22
4.3.2 Hasil Uji Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton Akibat Pembakaran.....	25
4.3.3 Pengaruh Perubahan Suhu.....	27
4.3.4 Pengaruh Lamanya Pembakaran.....	31
4.3.5 Perbedaan 2 Kuat Tekan Beton.....	38
4.3.6 Bentuk Grafik Tiga Dimensi dan Tabel.....	38
4.4 Normalisasi Kuat Tekan Beton.....	45
4.5 Hasil Grafik Eksperimen dibandingkan dengan Grafik Neville.....	47
4.6 Penggunaan Grafik.....	49
4.7 Penggunaan Tabel.....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	52
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	xv
LAMPIRAN.....	xvii

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1	Prosentase penurunan kuat tekan pada agregat : <i>Limestone, expanded shale, siliceous</i> 7
Gambar 2.2	Prosentase penurunan kuat tekan..... 9
Gambar 2.3	Pengaruh temperatur pada modulus elastisitas..... 10
Gambar 3.1	Tampak depan ruang pembakaran..... 12
Gambar 3.2	Bentuk <i>Nozzle</i> 13
Gambar 3.3	Tampak atas api 45° 13
Gambar 3.4	Tampak atas api 60° 13
Gambar 3.5	Bentuk penataan benda uji..... 14
Gambar 3.6	Sistem sirkulasi udara..... 15
Gambar 4.1	Hasil pembakaran suhu 300°C waktu 3 jam..... 22
Gambar 4.2	Hasil pembakaran suhu 300°C waktu 5 jam..... 23
Gambar 4.3	Hasil pembakaran suhu 300°C waktu 7 jam..... 23
Gambar 4.4	Hasil pembakaran suhu 600°C waktu 3 jam..... 23
Gambar 4.5	Hasil pembakaran suhu 600°C waktu 5 jam..... 24
Gambar 4.6	Hasil pembakaran suhu 600°C waktu 7 jam..... 24
Gambar 4.7	Hasil pembakaran suhu 900°C waktu 3 jam..... 24
Gambar 4.8	Hasil pembakaran suhu 900°C waktu 5 jam..... 25
Gambar 4.9	Hasil pembakaran suhu 900°C waktu 7 jam..... 25
Gambar 4.10	Perubahan kuat tekan beton 21,6 MPa..... 27
Gambar 4.11	Hasil regresi perubahan kuat tekan beton 21,6 MPa..... 28
Gambar 4.12	Perubahan kuat tekan beton 32,96 MPa..... 28
Gambar 4.13	Hasil regresi perubahan kuat tekan beton 32,96MPa..... 29
Gambar 4.14	Perubahan modulus elastisitas beton 21,6 MPa..... 29
Gambar 4.15	Hasil regresi perubahan modulus elastistas beton 21,6 MPa..... 30
Gambar 4.16	Perubahan modulus elastisitas beton 32,96 MPa..... 30
Gambar 4.17	Hasil regresi perubahan modulus elastistas beton 32,96 MPa..... 31
Gambar 4.18	Perubahan kuat tekan beton pada suhu 300°C..... 32
Gambar 4.19	Hasil Regresi perubahan kuat tekan beton pada suhu 300°C..... 32

Gambar 4.20	Perubahan kuat tekan beton pada suhu 600°C.....	33
Gambar 4.21	Hasil Regresi perubahan kuat tekan beton pada suhu 600°C.....	33
Gambar 4.22	Perubahan kuat tekan beton pada suhu 900°C.....	34
Gambar 4.23	Hasil Regresi perubahan kuat tekan beton pada suhu 900°C.....	34
Gambar 4.24	Perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 300°C.....	35
Gambar 4.25	Hasil regresi perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 300°C.....	35
Gambar 4.26	Perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 600°C.....	36
Gambar 4.27	Hasil regresi perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 600°C.....	36
Gambar 4.28	Perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 900°C.....	37
Gambar 4.29	Hasil regresi perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 900°C.....	37
Gambar 4.30	Perubahan tiga dimensi kuat tekan beton 21,6 MPa.....	39
Gambar 4.31	Perubahan tiga dimensi kuat tekan beton 32,96 MPa.....	40
Gambar 4.32	Perubahan tiga dimensi uji modulus elastisitas pada kuat tekan beton 21,6 MPa.....	41
Gambar 4.33	Perubahan tiga dimensi uji modulus elastisitas pada kuat tekan beton 32,96 MPa.....	42
Gambar 4.34	Normalisasi perubahan kuat tekan beton.....	45
Gambar 4.35	Normalisasi perubahan modulus elastisitas beton.....	45
Gambar 4.36	Perbandingan nilai modulus elastisitas Neville dan eksperimental.....	47
Gambar 4.37	Perbandingan nilai kuat tekan beton Neville dan eksperimental.....	47

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 3.1 Jenis nozzle untuk setiap pembakaran.....	13
Tabel 3.2 Rekap jumlah benda uji.....	16
Tabel 3.3 Desain campuran.....	17
Tabel 4.1 Hasil mix desain.....	21
Tabel 4.2 Nilai kuat tekan beton akibat pembakaran.....	25
Tabel 4.3 Prosentase kekuatan sisa.....	26
Tabel 4.4 Nilai modulus elastisitas beton akibat pembakaran.....	26
Tabel 4.5 Prosentase kekuatan sisa modulus elastisitas.....	27
Tabel 4.6 Perubahan kuat tekan beton (%).....	43
Tabel 4.7 Perubahan modulus elastisitas beton (%).....	44
Tabel 4.8 Perubahan kuat tekan beton dengan normalisasi.....	46
Tabel 4.9 Perubahan modulus elastisitas beton dengan normalisasi.....	46
Tabel 4.10 Perubahan modulus elastisitas secara polynomial.....	48
Tabel 4.11 Perubahan kuat tekan beton secara polynomial.....	48

DAFTAR LAMBANG

\varnothing	= diameter
t	= tinggi
f	= tegangan
P	= besar beban yang diterima benda uji
A	= luas permukaan
ϵ_b	= regangan beton
E	= modulus elastisitas
S	= tegangan

DAFTAR LAMPIRAN

	halaman
Lampiran A. Kurva Gradasi Pasir.....	xviii
Lampiran B. Kurva Gradasi Split.....	xix
Lampiran C. <i>Mix Design</i>	xx
Lampiran D. Foto 1. Pencetakan benda uji	
Foto 2. <i>Curing</i>	xxi
Lampiran E. Foto 3. Termometer	
Foto 4. <i>Blower</i>	xxii
Lampiran F. Foto 5. Beton yang dibakar pada suhu 300°C selama 3 jam	
Foto 6. Beton yang dibakar pada suhu 300°C selama 5 jam.....	xxiii
Lampiran G. Foto 7. Beton yang dibakar pada suhu 300°C selama 7 jam	
Foto 8. Beton yang dibakar pada suhu 600°C selama 3 jam.....	xxiv
Lampiran H. Foto 9. Beton yang dibakar pada suhu 600°C selama 5 jam	
Foto 10. Beton yang dibakar pada suhu 600°C selama 7 jam.....	xxv
Lampiran I. Foto 11. Beton yang dibakar pada suhu 900°C selama 3 jam	
Foto 12. Beton yang dibakar pada suhu 900°C selama 5 jam.....	xxvi
Lampiran J. Foto 13. Beton yang dibakar pada suhu 900°C selama 7 jam.....	xxvii
Lampiran K. Foto 14. Alat uji Kuat Tekan Beton	
Foto 15. Alat Uji Modulus Elastisitas Beton.....	xxviii
Lampiran L. Foto 16. Tempat Pembakaran	
Foto 17. Tempat <i>Nozzle</i>	xxix
Lampiran M. Pengujian Kuat Tekan Beton.....	xxx
Lampiran N. Pengujian Modulus Elastisitas Beton.....	xxxvi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beberapa bangunan sipil dalam beberapa tahun terakhir ini 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.

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 (dalam hal ini ditinjau dari betonnya) 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 (seberapa besar mempengaruhi beton). 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, sehingga lendutannya pun menjadi besar.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian beton paska bakar pada dasarnya sudah ada yang meneliti, bahkan oleh Neville dalam bukunya *Properties of Concrete* juga sudah mengulasnya. Namun pada banyak penelitian hanya menampilkan hubungan prosentase penurunan kuat tekan dengan suhu; prosentase penurunan modulus elastisitas dengan suhu tanpa adanya kejelasan pada berapa lama waktunya beton terbakar dan pada kuat tekan berapa beton yang terbakar. Padahal hal tersebut merupakan faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan

kuat tekan beton paska terbakar. Selain itu biasanya penelitian hanya terbatas sampai suhu 800°C.

Penelitian ini juga akan mencari perubahan kuat tekan dan modulus elastisitas beton mutu normal akibat temperatur tinggi, dimana kuat tekan beton yang ditinjau K225 dan K350 yang akan dibakar pada suhu 300°C, 600°C, 900°C, pada lama waktu 3 jam, 5 jam, dan 7 jam.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui hubungan antara suhu, waktu/lama beton yang terbakar untuk beton mutu normal. Dengan adanya 2 kuat tekan beton yang digunakan, maka dapat diketahui perbedaan antara kuat tekan beton tersebut terhadap pengaruh temperatur tinggi. Sehingga dengan adanya data waktu dan suhu dari suatu kebakaran bangunan sipil, dapat diperkirakan tingkat kelayakan penggunaan dari beton yang telah terbakar.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menggambarkan perilaku mengenai pengaruh kebakaran beton terhadap perilaku mekanisnya. Perilaku yang terjadi dapat digunakan sebagai acuan apabila ada struktur bangunan beton yang terbakar dalam rentang suhu sampai dengan 900°C atau bahkan lebih dan dengan rentang waktu sampai 7 jam atau lebih.

1.4 Ruang lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi hanya pada beton mutu normal. Ruang lingkup penelitian terbatas pada :

1. Beton yang diolah, dicetak dan dirawat pada umur 28 hari
2. Material yang digunakan :
 - a. Semen portland
 - b. Pasir muntilan
 - c. Batu pecah
 - d. Air di laboratorium

3. Mutu beton yang akan digunakan K225 dan K350
4. Suhu yang akan digunakan 300°C, 600°C, 900°C
5. Waktu pembakaran beton yang akan digunakan 3 jam, 5 jam, dan 7 jam

1.5 Sasaran Penelitian

Beton yang terbakar pada dasarnya mengalami tingkat kerusakan yang berbeda-beda, hal ini diakibatkan oleh beberapa hal misalnya lokasi, fungsi bangunan, tingkat suhu, lamanya pembakaran yang mengenai beton. Pada penelitian ini selain untuk mengetahui perubahan kuat tekan dan modulus elastisitas beton akibat perubahan suhu yang tinggi juga untuk mengetahui faktor lamanya pembakaran dan macam kuat tekan beton yang digunakan, sehingga bisa diketahui tingkat kerusakannya tanpa melakukan pengujian di laboratorium. Pada tingkat kerusakan inilah bisa dilakukan langkah selanjutnya untuk perbaikan.

Macam pengujian :

- a. Kuat tekan terhadap benda uji silinder \varnothing 15 cm, t = 30 cm umur 28 hari tanpa pembakaran, sebagai beton kontrol.
- b. Modulus elastisitas terhadap benda uji silinder \varnothing 15 cm, t = 30 cm umur 28 hari tanpa pembakaran, sebagai beton kontrol.
- c. Kuat tekan terhadap benda uji silinder \varnothing 15 cm, t = 30 cm umur 28 hari dengan pembakaran
- d. Modulus elastisitas terhadap benda uji silinder \varnothing 15 cm, t = 30 cm umur 28 hari dengan pembakaran

Berdasarkan data tersebut di atas dapat dibuat hubungan antara suhu, kuat tekan dan lama waktu pembakaran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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.

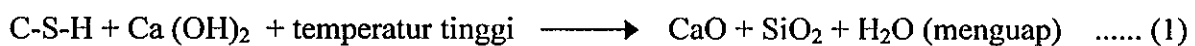
Beton merupakan material bangunan yang memiliki tahanan terhadap api / panas yang unggul dibandingkan jenis material lain, seperti kayu atau baja. Hal ini disebabkan karena beton merupakan penghantar panas yang lemah (*low thermal conductivity*), sehingga dapat membatasi kedalaman penetrasi panas. Selain 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. (Soemardi, dan Munaf,1998)

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.

Menurut Sumardi P.C. 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. Pada temperatur antara $100^\circ C$ s/d $300^\circ C$, menurut Castillo dan Durrani (1990), 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, HRC, 2000).

Pada suhu diatas $300^\circ C$ 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 $300^\circ C$

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 (1975), 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.

2.2 Sifat Termal Agregat

Sifat termal agregat mempengaruhi keawetan dan kualitas lain dari betonnya. Sifat-sifat utama sifat termal agregat yaitu : (Tjokrodimulyo,1996)

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

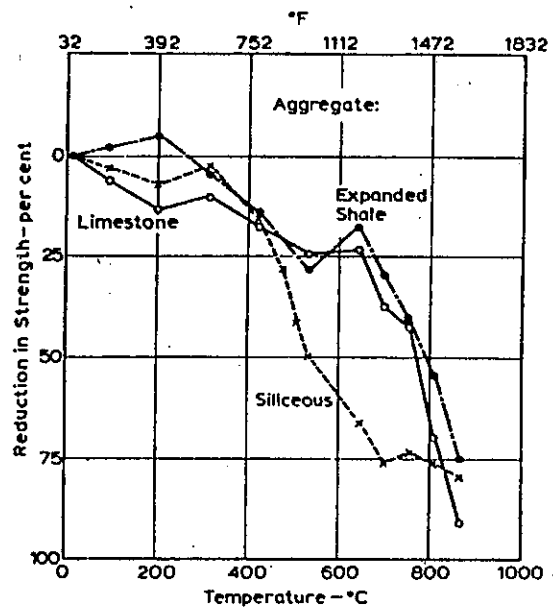
Koefisien muai beton bertambah dengan bertambahnya sifat muai agregat yang dipakai. Jika koefisien muai agregat dan pasta semen berbeda terlalu besar, maka jika terjadi perubahan suhu dapat mengakibatkan perbedaan gerakan sehingga dapat melepaskan lekatan antar agregat dan pasta. Jika koefisien muai 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, seperti dapat dilihat pada gambar 2.1 : (Neville, 1996)



Gambar 2.1 Prosentase penurunan kuat tekan pada agregat :
Limestone, Expanded shale, Siliceous

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

2.3.1 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.

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton untuk menahan tekanan hingga suatu batas maksimum, tanpa menyebabkan keruntuhan pada beton. Kuat tekan beton diwakili oleh

tegangan tekan maksimum dengan satuan N/mm^2 atau MPa. Nilai kuat tekan beton ini didapatkan melalui tata cara pengujian standar, menggunakan mesin uji dengan cara memberikan beban tekan bertingkat dengan kecepatan peningkatan beban tertentu terhadap benda uji silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm sampai hancur. Kuat tekan masing-masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tertinggi yang dicapai benda uji umur 28 hari, akibat beban tekan selama percobaan.

Tegangan yang dimaksud adalah tegangan maksimum pada saat regangan beton (ϵ_b) mencapai nilai $\pm 0,002$. Beban tekan ini adalah beban tekan maksimum yang dapat diberikan pada benda uji tersebut dan regangan hancur, f dari benda uji silinder ditentukan dengan persamaan :

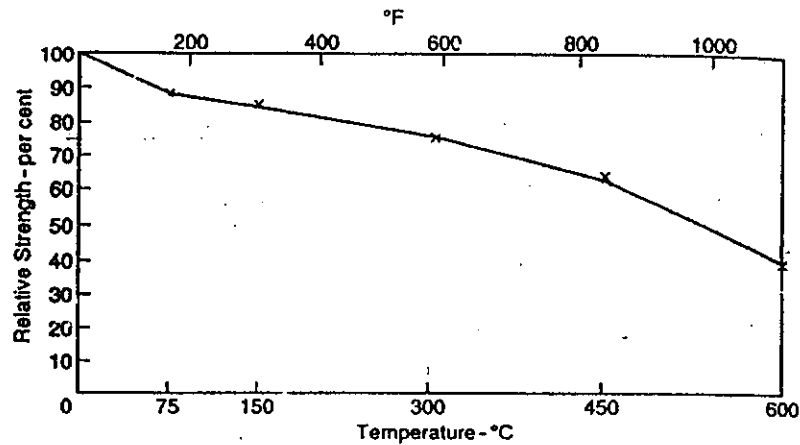
$$f = \frac{P}{A} \quad \text{MPa} \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana P adalah besar beban yang dapat diterima oleh benda uji hingga hancur (N) dan A adalah luas permukaan benda uji yang menerima beban (mm^2).

Pada saat bangunan gedung mengalami kebakaran, maka struktur beton akan mengalami pemanasan. Suhu ruangan bias mencapai lebih dari $900^\circ C$. 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. Amir Partowiyanto dan Sudarmadi mengungkapkan bahwa untuk suhu sampai $300^\circ C$ kekuatan sisa dari beton masih cukup tinggi sekitar 80%. Untuk suhu diatas $500^\circ C$ penurunan kekuatan sisa yang terjadi sangat tajam. Pada suhu $700^\circ C$ kekuatan sisanya hanya tinggal 35%, sehingga praktis beton dianggap tidak memiliki kekuatan struktural. Crozier dkk (1998) mengungkapkan bahwa kuat tekan beton setelah dibakar pada temperatur $400^\circ C$, $600^\circ C$, dan $800^\circ C$ adalah masing-masing sebesar 35%, 60% dan 80% terhadap kondisi normal. Atau bisa dikatakan bahwa kekuatan sisa untuk temperatur $400^\circ C$, $600^\circ C$, dan $800^\circ C$ adalah 65%, 40% dan 20%.

Kuat tekan beton setelah mengalami pengapian sampai suhu $600^\circ C$ 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, yang dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Prosentase penurunan kuat tekan

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.

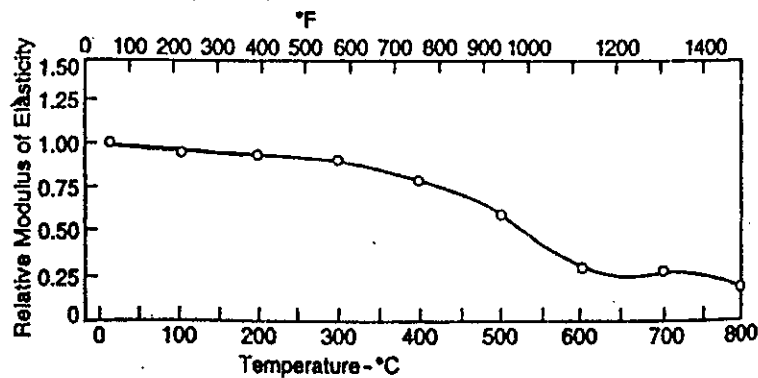
Pada tes bakar beton jelas tampak bahwa kadar air berpengaruh pada kuat tekan, dimana jumlah air yang berlebihan pada saat awal pembakaran menyebabkan pemisahan. Pada dasarnya kadar air pada beton adalah faktor yang sangat penting menentukan perilaku struktur pada temperatur tinggi.

2.3.2 Modulus elastisitas pada temperatur tinggi

Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan sesuai dengan standar ASTM C-469. Pengujian ini dilakukan bersama-sama dengan pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari.

Benda uji dengan alat uji modulus elastisitas diberi beban secara perlahan-lahan. Deformasi aksial yang terjadi diukur, dan dihitung besar regangannya dengan cara membagi deformasi aksial dengan panjang *gage line*. Panjang *gage line* adalah jarak antara ring atas dan ring bawah pada alat uji modulus elastisitas.

Perilaku dari beton seringkali disebabkan dari modulus elastisitas dan modulus elastisitas ini betul-betul dipengaruhi oleh temperatur. Pengaruh temperatur pada modulus elastisitas oleh Neville ditunjukkan pada gambar 2.3 sebagai berikut :



Gambar 2.3 Pengaruh temperatur pada modulus elastisitas beton

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. Pengondoran 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.

Hansen juga menyatakan hal yang sama seperti Neville yaitu penurunan modulus elastisitas dipengaruhi oleh kenaikan temperatur. Nilai modulus elastisitas menurun 25% bila dipanaskan sampai 500°F (260°C) dan mengalami penurunan 50% bila dipanaskan hingga temperatur 800°F (427°C). (Hansen, 1976).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Penelitian yang telah dilakukan mengenai perubahan perilaku mekanis beton akibat temperatur meneliti beton yang terkena temperatur yang tinggi yaitu 300 °C, 600 °C, 900 °C selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam untuk masing-masing suhu. Penelitian ini diharapkan dapat memudahkan pencarian perubahan kuat tekan dan modulus elastisitas beton paska beton terbakar.

3.2 Program Eksperimental

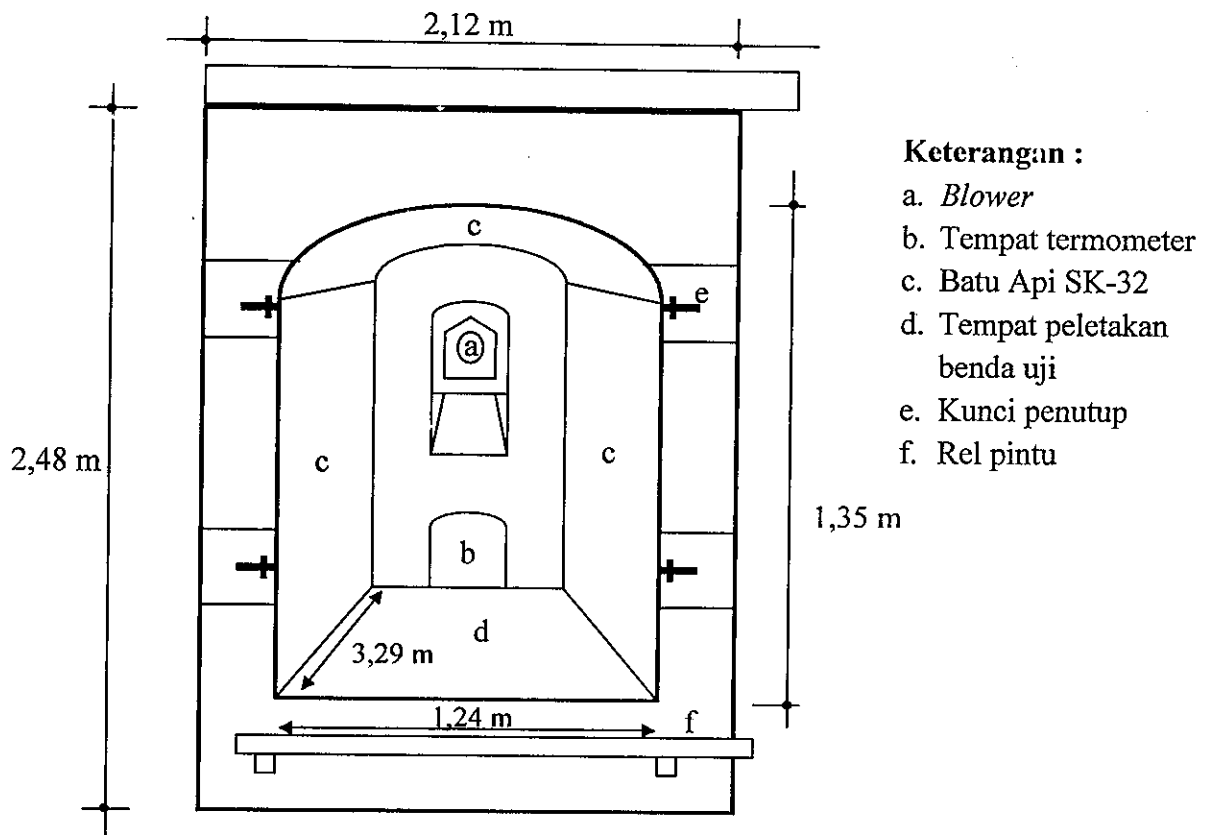
3.2.1 Parameter Pengujian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kuat tekan beton dan modulus elastisitas mencakup beton tanpa dibakar maupun beton yang dibakar. Parameter yang ditinjau meliputi suhu yaitu 300°C, 600 °C, dan 900 °C, dan masing-masing suhu dibakar selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam.

3.2.2 Peralatan Eksperimental

a. Ruang Pembakaran

Ruang pembakaran ini sebenarnya tidak dirancang khusus untuk pembakaran beton, sehingga ukurannya pun tampak besar. Tempat pembakaran ini 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 × 1,24 × 3,29 meter cukup luas untuk membakar 12 benda uji untuk setiap pembakaran, namun tidak mempengaruhi hasil pembakaran. Gambar 3.1 memperlihatkan bentuk dari ruang pembakaran.



Gambar 3.1 Tampak Depan Ruang Pembakaran

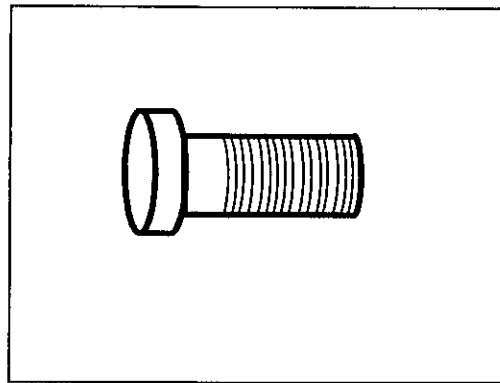
b. *Sistem Pemanas Ruangan*

Api yang dihasilkan oleh *blower* tergantung dari *nozzle* yang digunakan. Semakin besar nilai *nozzle* maka api yang dihasilkan semakin besar pula, namun berakibat penggunaan solar yang bertambah banyak. Pembakaran untuk setiap *nozzlenya* adalah 4 liter/jam, jadi jika digunakan *nozzle* 7.45° membutuhkan bahan bakar solar = $7 \times 4 = 28$ liter/jam. Digunakannya solar karena dibandingkan minyak tanah solar masih memiliki oli pelicin sehingga untuk mesin lebih bagus, tidak kering.

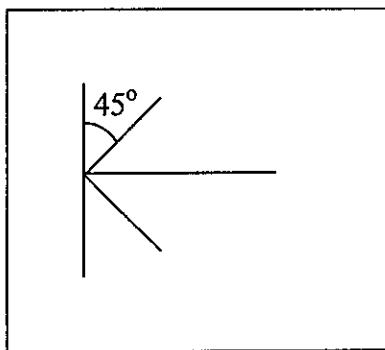
Pada penelitian ini digunakan *nozzle* yang berbeda-beda untuk menghasilkan variasi suhu dan lama waktu pembakaran yang berbeda-beda. Tabel 3.1 menunjukkan jenis *nozzle* yang digunakan untuk setiap pembakaran, dan gambar 3.2 merupakan bentuk *nozzle*.

Tabel 3.1 Jenis *Nozzle* untuk Setiap Pembakaran

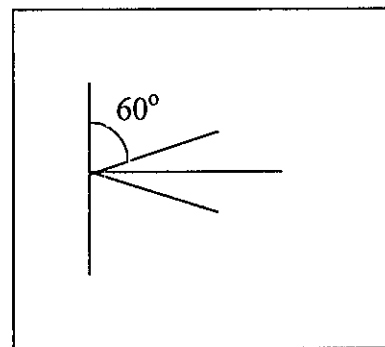
Waktu	Suhu		
	300°C	600°C	900°C
3 jam	6.45°	7.45°	7.45°
5 jam	5.60°	6.45°	7.45°
7 jam	4.45°	6.45°	6.45°

Gambar 3.2 Bentuk *Nozzle*

Ada beberapa suhu yang menggunakan *nozzle* yang sama namun menghasilkan suhu dan lama waktu yang berbeda. Hal ini dapat dibedakan yaitu dengan memendekkan jilatan api. Pada setiap *nozzle* ada nilai derajatnya yaitu 45° dan 60°. Derajat ini tidak membedakan besarnya api yang dihasilkan, namun bentuk dari apinya dapat dilihat pada gambar 3.3 dan gambar 3.4.



Gambar 3.3 Tampak Atas Api 45°

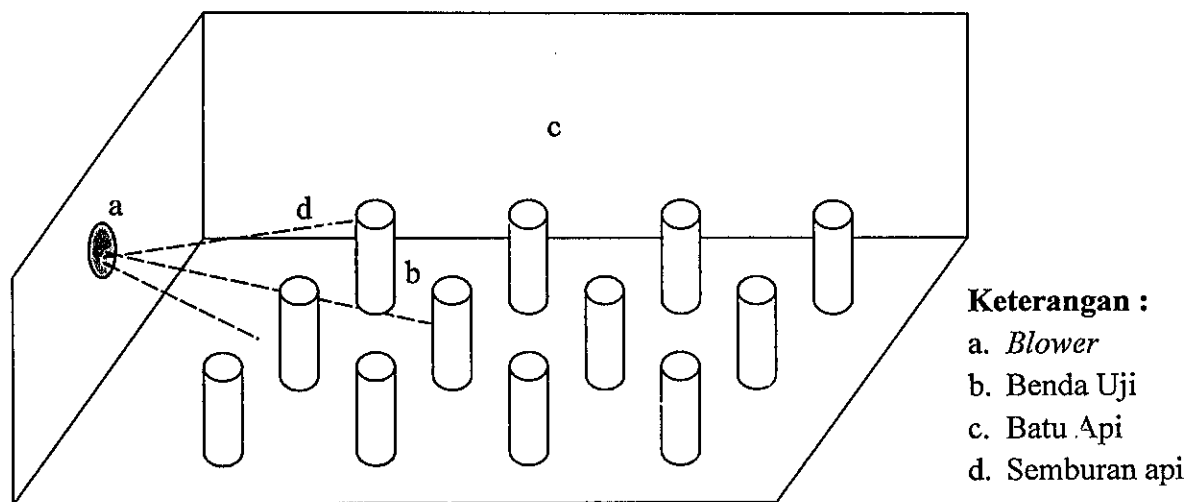


Gambar 3.4 Tampak Atas Api 60°

Jadi untuk *nozzle* 45° semburan api yang dihasilkan melebar kesamping tapi jarak semburan pendek, sedangkan untuk *nozzle* 60° semburan api yang dihasilkan sempit tetapi jarak semburan panjang.

c. Penataan Benda Uji

Peletakan benda uji pada ruang pembakaran mempengaruhi hasil pembakaran benda uji, untuk itu diperlukan suatu penataan sehingga semburan apimerata keseluruhan benda uji. Jika hanya beberapa benda uji saja yang terkena jilatan api sedangkan yang lain hanya terkena suhu ruang saja, maka kuat tekan dan modulus elastisitas dari beton pada satu pembakaran akan menunjukkan perbedaan yang signifikan. Untuk itu pada penelitian ini benda uji ditata berdiri satu-satu tanpa ada yang ditumpuk, selain karena ruang pembakaran yang cukup luas dengan hanya 12 benda uji yang dimasukkan, dengan ditata satu per satu berarti jilatan api bisa mengenai bagian dekat *blower* maupun yang jauh dari pengapian. Karena jika ditumpuk, berarti benda uji yang didepan akan menghalangi benda uji yang jauh dengan *blower*. Gambar 3.5 memperlihatkan penataan benda uji untuk setiap pembakaran.



Gambar 3.5 Bentuk Penataan Benda Uji

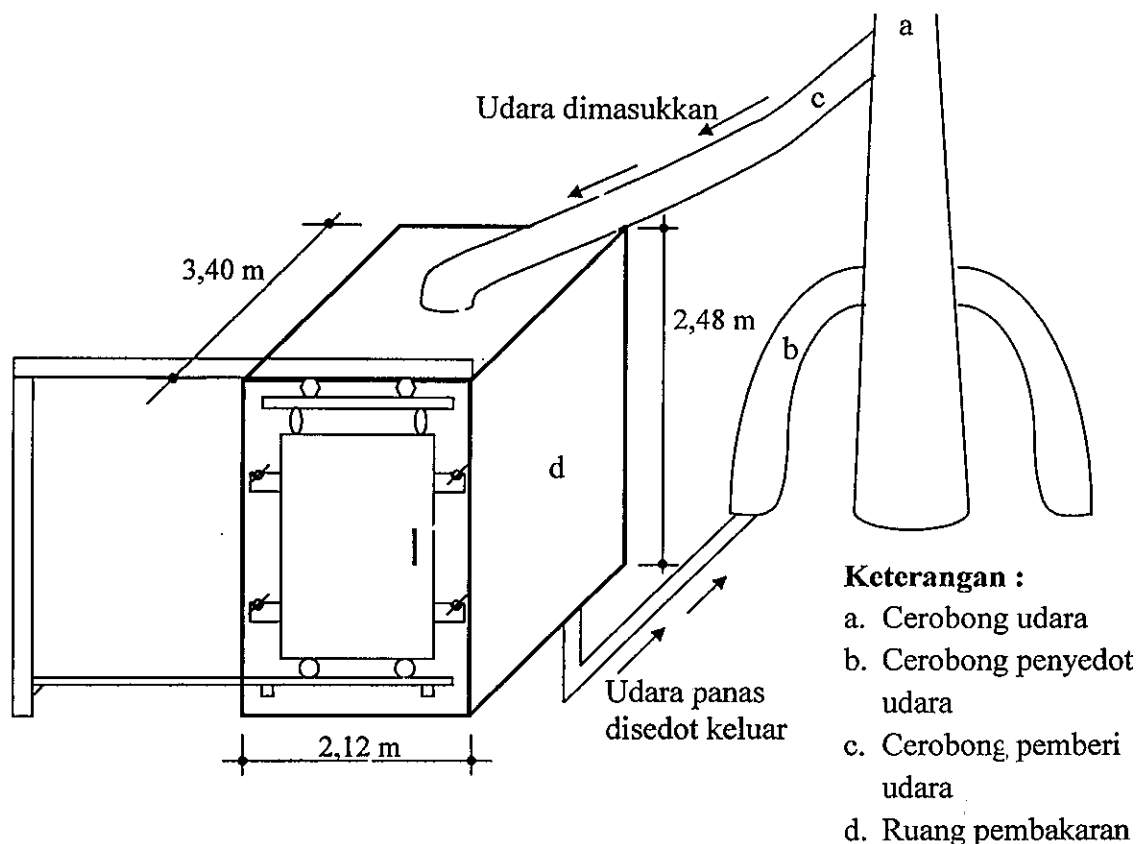
d. Sistem Bekerjanya Alat

Alat yang digunakan untuk pembakaran ini mempunyai dua tenaga untuk menjalankan pembakaran, yaitu listrik dan solar. Listrik untuk menjalankan *blower* angin sedangkan solar untuk menjalankan api. Berikut cara bekerjanya alat :

1. semua pintu ruangan ditutup dan dikunci rapat-rapat
2. listrik dinyalakan untuk suplai angin

3. *blower* api dinyalakan
4. penyedot angin dinyalakan. Penyedot angin ini berfungsi supaya hawa panas tidak terlalu berkumpul di dalam ruangan, sehingga mengakibatkan ledakan.

Gambar 3.6 memperlihatkan sistem sirkulasi udara di dalam ruang pembakaran.



Gambar 3.6 Sistem Sirkulasi Udara

3.3 Pembuatan Benda Uji

3.3.1 Bahan Dasar Pembentuk Beton

Beton adalah suatu komposit dari beberapa bahan batu-batuan yang direkatkan oleh bahan ikat. Beton dibentuk dari agregat campuran (halus dan kasar) dan ditambah dengan pasta semen. Singkatnya dapat dikatakan bahwa pasta semen mengikat pasir dan bahan-bahan agregat lain (batu kerikil).

a. Semen

Semen yang digunakan adalah Semen Gresik tipe I, dimana tipe I adalah semen standar yang digunakan untuk semua bangunan beton biasa yang tidak akan mengalami perubahan cuaca yang dasyat atau dibangun dalam lingkungan yang sangat korosif.

b. *Agregat Halus*

Agregat halus yang digunakan adalah pasir Muntilan, dimana agregat ini merupakan butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton. Kurva gradasi agregat halus terlihat pada lampiran 1.

c. *Agregat Kasar*

Agregat kasar yang digunakan adalah dari daerah Jepra. Agregat kasar ini pada saat pencampuran pada kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*). Kurva gradasi agregat kasar terlihat pada lampiran 2.

d. *Air*

Air yang dipakai adalah air dari sumur bor yang memenuhi persyaratan untuk air campuran beton.

3.3.2 Spesifikasi Benda Uji

Benda uji yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah silinder beton standar dengan ukuran diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm.

Perincian penggunaan benda uji dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rekap Jumlah Benda Uji

Kuat Tekan Beton	Perlakuan	Jenis pengujian	Jumlah Benda uji
K 225	Tanpa pemanasan	Kuat tekan	4
		Modulus elastisitas	2
	Dengan pemanasan	Kuat tekan	36
		Modulus elastisitas	18
K 350	Tanpa pemanasan	Kuat tekan	4
		Modulus elastisitas	2
	Dengan pemanasan	Kuat tekan	36
		Modulus elastisitas	18

3.3.3 Desain Campuran

Rencana campuran beton ditunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Desain Campuran

Tipe Campuran	Struktur	Struktur
<i>Grade</i>	K225	K350
Semen (kg/m^3)	285	355
Air (l/m^3)	190	190
Faktor Air Semen (kg/m^3)	0,67	0,54
<i>Split</i> (kg/m^3)	920	940
Pasir (kg/m^3)	990	910

3.4 Perawatan Benda Uji

Perawatan benda uji dilakukan dengan merendam benda uji ke dalam bak air. Perawatan di dalam air dimulai setelah campuran beton berumur 24 jam, selama 28 hari.

3.5 Pemanasan Benda Uji

Setelah berumur 28 hari benda uji mulai dipindahkan dari bak rendaman dan dikirim ke tempat pembakaran. Pada hari berikutnya benda uji sebanyak 12 buah dibakar di tungku pembakaran krematorium Kedungmundu Semarang. Benda uji dimasukkan ke dalam tungku pembakaran dan dibakar selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam pada suhu 300°C , 600°C , dan 900°C .

3.6 Pengujian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton

Selesai pembakaran dilakukan pengujian modulus elastisitas dan kuat tekan beton.

A. Uji Kuat Tekan

a. Peletakkan benda uji

Letakkan benda uji (lebih rendah) pada balok yang datar. Luruskan sampel secara hati-hati sesuai dengan poros tengahnya landasan berbentuk plat silinder. Putar landasan ini, gerakkan secara hati-hati oleh tangan sehingga posisinya sesuai.

b. Rata-rata pembebanan

Tambahkan beban secara terus menerus dan tanpa kejutan.

1. Atur sejenis skrup pada mesin uji, sehingga bagian kepala berputar pada kecepatan kurang lebih 0,05 in (1,3 mm)/min, pada saat mesin tidak bergerak.

Untuk mesin hidrolik, pembebanan akan ditambahkan pada saat rata-rata pergerakan sesuai rata-rata pembebanan pada sample dengan jarak 20 sampai 50 psi/s (0,14 sampai 0,34 MPa/s).

2. Tambahkan beban sampai sample hancur dan catat beban maksimum yang dihasilkan sample pada pengujian.

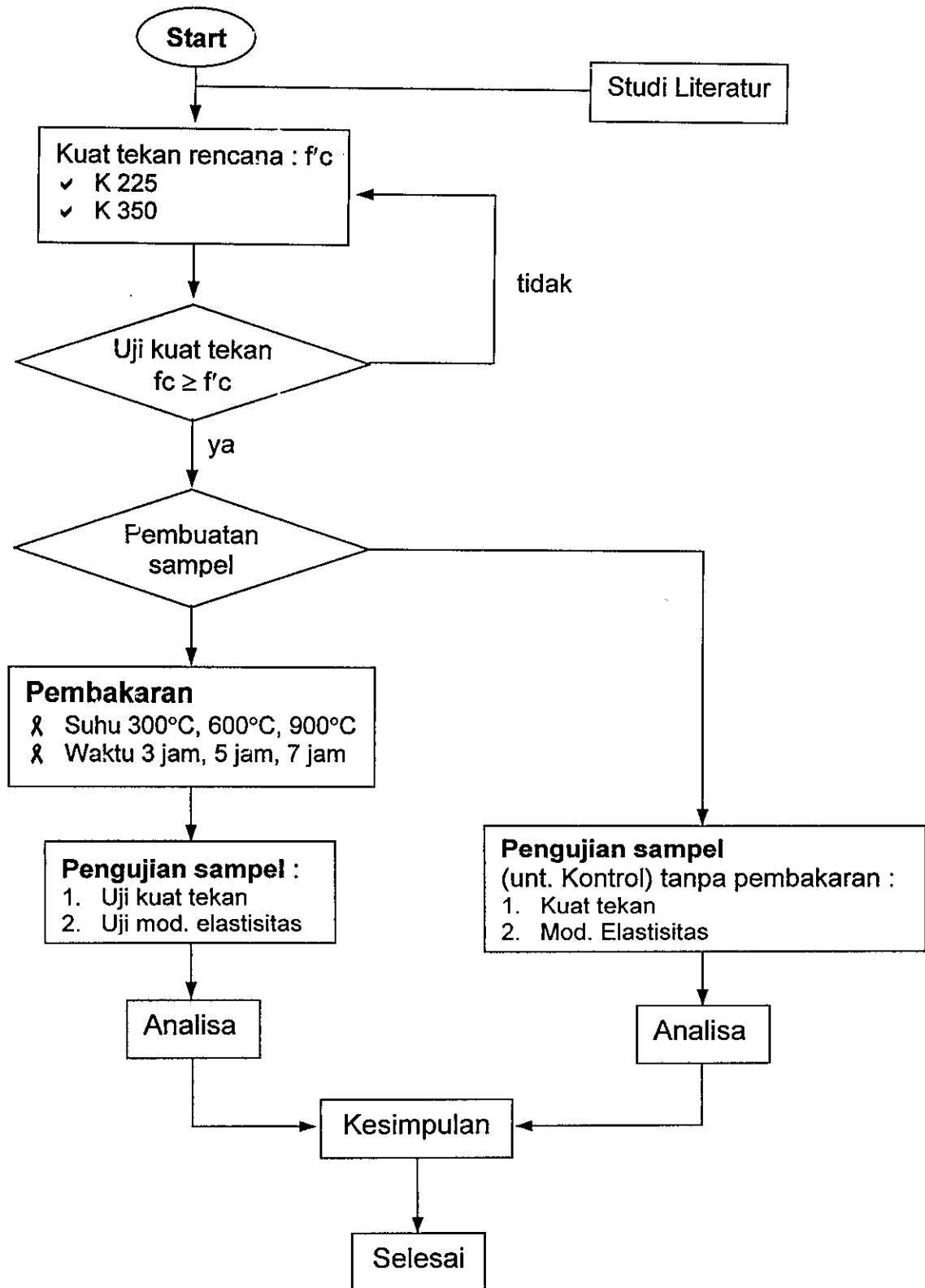
B. Uji Modulus Elastisitas

- a. Tempatkan benda uji dengan dipasangi alat pengukur regangan pada bagian bawah silinder/bantalan pada mesin penguji. Dengan hati-hati luruskan sumbu benda uji dengan arah tengah bagian atas dudukan berbentuk lingkaran. Catat bacaan pada penunjuk regangan. Landasan berbentuk plat silinder untuk sample, putar landasan ini, gerakkan secara hati-hati oleh tangan sehingga posisinya sesuai.
- b. Atur sejenis sekrup pada mesin penguji sehingga kepala penggerak berjalan pada kecepatan 0,05 in (1,25 mm)/menit ketika mesin tidak bergerak.
- c. Pada mesin hidrolik, tambahkan beban secara konstan dengan jarak 35 ± 5 psi (241 ± 34 KPa)/s. Catat, tanpa gangguan pembebanan, penambahan beban dan regangan longitudinal pada poin (1) ketika regangan longitudinal adalah $50 \cdot 10^{-6}$ dan (2) ketika penambahan beban sama sampai 40% dari beban ultimit. Regangan longitudinal akan seperti deformasi longitudinal total yang dibagi panjang ukuran efektif. *Poisson ratio* akan dapat didefinisikan, catat regangan melintang pada titik yang sama.

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \dots\dots\dots (3)$$

- dimana :
- E_c = modulus elastisitas (Psi)
 - S_1 = tegangan pada strain 0,000050 (Psi)
 - S_2 = tegangan pada 40% beban ultimate (Psi)
 - ε_2 = regangan pada saat S_2 tercapai

3.7 Bagan Alir



BAB IV

HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Menentukan rusak tidaknya suatu bangunan akibat kebakaran, sebenarnya tidak terlalu susah. Dengan kasat mata dapat dilihat bahwa bahan bangunan yang mudah terbakar akan hancur, mungkin menjadi debu. Bahan bangunan seperti beton biasanya tidak hancur, mungkin bagian permukaannya berubah warna menjadi hitam karena hangus terjilat api. Sebenarnya, beton memiliki beberapa keunggulan, terutama dalam hal kekuatannya terhadap api. Beton mempunyai konduktivitas panas yang rendah, sehingga beda antara suhu yang sangat tinggi dan suhu kamar membuat panas api akan sulit menembus bagian dalam beton. Namun, beton ini pun mempunyai keterbatasan. Apabila beton terkena semburan api dalam waktu yang cukup lama, serta suhu yang tinggi, maka struktur beton akan mengalami kerusakan. Jadi kalau beton tersebut ingin dipertahankan pada bangunan tersebut, maka perlu dilakukan pemeriksaan yang intensif, berupa perkiraan kekuatan beton yang tersisa.

Secara visual, kerusakan akibat suhu api yang tinggi pada bagian permukaan maupun yang dalam beton tersebut, dapat ditandai dengan suatu kriteria berupa perubahan warna. Pada beton tertentu akan menunjukkan warna merah (pink) setelah terpanggang oleh api dalam rentang suhu antara 300-600°C, karena telah terjadi dekomposisi senyawa besi yang terdapat di dalam beton. Namun, pemeriksaan secara penglihatan biasa memiliki beberapa kelemahan. Tidak semua beton akan menunjukkan perubahan warna yang dimaksud. Bahkan, sangat tidak mungkin untuk menentukan perubahan warna pada suatu kedalaman beton.

Serangkaian penelitian yang dilakukan, pada bagian akhir juga dilakukan pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas di laboratorium, dianalisis untuk mengetahui perubahan sifat mekanis beton akibat pengaruh temperatur yang tinggi. Untuk tujuan tersebut, pengujian beton yang dibakar pada temperatur 300°C, 600°C, 900°C pada lama waktu 3 jam, 5 jam, 7 jam dibandingkan dengan beton tanpa pembakaran.

4.2 Hasil Mix Desain

Pada penelitian ini direncanakan beton dengan kuat tekan K 225 dan K 350. Tabel 4.1 merupakan hasil dari mix desain.

Tabel 4.1 Hasil Mix Desain

Mix Desain	Slump (cm)	Faktor Air Semen	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Elastisita (MPa)
K 225	11,5	0,67	21,6	21.842,60
K 350	12	0,54	32,96	26.986,77

Hasil pengecoran di tabel 4.1 menunjukkan nilai slump 11,5 cm dan 12 cm, yang berarti spesi beton kekentalannya masih dalam tahap normal, sehingga tidak begitu menyulitkan pada pelaksanaannya. Keleccakan (*workability*) ini dipengaruhi oleh :

1. Kadar semen.

Penambahan semen ke dalam campuran juga memudahkan cara pengerjaan adukan betonnya, karena pasti diikuti dengan bertambahnya air campuran untuk memperoleh nilai faktor air semen yang tetap.

2. Tipe Semen

Adanya tipe semen yang bermacam-macam tentunya memiliki fungsi yang berbeda-beda, misal tipe I untuk bangunan beton biasa, sedang tipe II untuk pembetonan masal sehingga semen mengeluarkan panas hidrasi lebih rendah serta dengan kecepatan penyebaran panas yang rendah pula. Untuk itu tipe semen mempengaruhi keleccakan.

3. Kadar Agregat

Bila kadar agregat mengikuti peraturan maka adukan beton akan mudah dikerjakan.

4. Kadar Air

Jumlah air yang dipakai dalam campuran adukan beton. Makin banyak air dipakai maka makin mudah beton segar itu dikerjakan.

Pada tabel 4.1 nampak bahwa semakin tinggi nilai faktor air semen kuat tekan beton pun semakin rendah berarti hal ini sesuai dengan kondisi biasa bukan kondisi khusus dimana nilai faktor air semennya kondisi optimum.

Hasil uji kuat tekan beton menunjukkan bahwa kuat tekan beton yang dihasilkan mendekati dengan yang direncanakan, yaitu untuk kuat tekan beton K 225 dihasilkan kuat tekan beton 21,6 MPa, sedangkan untuk kuat tekan K 350 dihasilkan kuat tekan beton 32,96 MPa.

4.3 Hasil Pembakaran

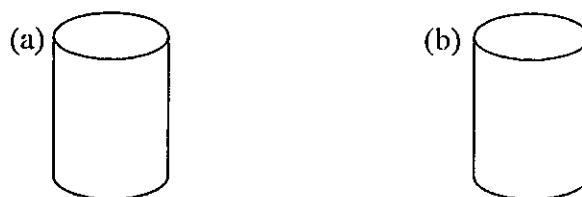
4.3.1 Pengamatan Visual

Pembakaran dilakukan beberapa hari dengan menggunakan *nozzel* yang berbeda-beda untuk menghasilkan suhu dan waktu sesuai dengan rencana penelitian. Semakin tinggi *nozzle* yang digunakan maka semburan apinya pun juga semakin besar, namun risikonya solar juga semakin banyak dibutuhkannya. Untuk derajatnya, menunjukkan panjang jilatan api. Derajat 45 berarti semburan panjang kedepan, sedangkan jika derajatnya 60 berarti semburan melebar kesamping dan jilatannya semakin pendek.

Pada saat selesai melakukan pembakaran maka penelitian yang bisa dilakukan adalah pengamatan fisik. Pengamatan fisik itu bisa dengan melihat perubahan warna ataupun perubahan kondisi beton.

a. Pembakaran suhu 300°C, waktu 3 jam

Pembakaran dilakukan dengan menggunakan *nozzle* 6.45°. Hasil dari beton yang dibakar pada suhu 300°C, waktu 3 jam adalah beton mengalami perubahan warna, namun perubahannya tidak begitu jauh berbeda dengan aslinya. Beton sedikit berkapur bagian kulitnya. Pada gambar 4.1 dapat dilihat perubahannya.



Gambar 4.1. Hasil pembakaran suhu 300°C waktu 3 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

b. Pembakaran suhu 300°C, waktu 5 jam

Pembakaran dengan menggunakan *nozzle* 5.45°, menghasilkan beton yang sama pada saat pembakaran suhu 300°C, waktu 3 jam, namun mengalami sedikit retak-retak rambut halus, yang dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Hasil pembakaran suhu 300°C waktu 5 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

c. Pembakaran suhu 300°C, waktu 7 jam

Pada pembakaran ini dilakukan penggantian *nozzle* kembali yaitu menggunakan *nozzle* 4.60° supaya menghasilkan suhu yang sama namun dalam waktu yang lebih lama. Hasil dari pembakaran beton ini yaitu beton berwarna tidak jauh beda dari aslinya, sama halnya dengan pembakaran sebelumnya pada suhu yang sama, namun retak yang dihasilkan lebih banyak meskipun masih dalam taraf retak tipis-tipis. Pola dari retak dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.3. Hasil pembakaran suhu 300°C waktu 7 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

d. Pembakaran suhu 600°C, waktu 3 jam

Pembakaran menggunakan *nozzle* 7.45°, membuat beton berwarna merah muda pada bagian luar dan dalamnya. Karena ada bagian dari beton yang terkelupas sehingga nampak bagian dalamnya. Pada pembakaran inipun juga mengakibatkan bagian permukaan beton berkapur. Pada gambar 4.4 dapat dilihat pola retaknya.



Gambar 4.4. Hasil pembakaran suhu 600°C waktu 3 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

- e. Pembakaran suhu 600°C , waktu 5 jam

Pembakaran menggunakan *nozzle* 6.45° , membuat beton sama seperti kondisi pembakaran suhu 600°C , waktu 3 jam, hanya pola retak yang dapat dilihat pada gambar 4.5 dan kapur yang dihasilkan lebih banyak.



Gambar 4.5. Hasil pembakaran suhu 600°C waktu 5 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

- f. Pembakaran suhu 600°C , waktu 7 jam

Pembakaran dilakukan dengan menggunakan *nozzle* yang sama pada pembakaran suhu 600°C , waktu 5 jam namun untuk menghasilkan lama waktu yang berbeda blower tidak dibuka maksimal. Sehingga hasil dari pembakaran tersebut beton mengalami retak dengan tebal 1 mm seperti yang tampak pada gambar 4.6, dengan kondisi warna beton merah muda dan permukaannya berkapur.



Gambar 4.6. Hasil pembakaran suhu 600°C waktu 7 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

- g. Pembakaran suhu 900°C , waktu 3 jam

Pembakaran menggunakan *nozzle* 7.45° , membuat beton mengalami retak 1,5 mm yang dapat dilihat pola retaknya pada gambar 4.7 dan permukaannya banyak berkapur dan jika diusap tampak warna beton berubah menjadi keabu-abuan.



Gambar 4.7. Hasil pembakaran suhu 900°C waktu 3 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

h. Pembakaran suhu 900°C , waktu 5 jam

Pembakaran menggunakan *nozzle* 7.45° , beton mengalami kondisi yang sama dengan pembakaran suhu 900°C , waktu 3 jam. Namun retak dan kapur yang dihasilkan lebih banyak. Pola retak ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8. Hasil pembakaran suhu 900°C waktu 5 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

i. Pembakaran suhu 900°C , waktu 7 jam

Pembakaran menggunakan *nozzle* 6.45° . Beton pada pembakaran ini kondisinya sudah hampir bengkak, retak yang dihasilkan setebal 2 mm yang dapat dilihat pola retaknya pada gambar 4.9. Pada permukaan beton banyak sekali kapurnya.



Gambar 4.9. Hasil pembakaran suhu 900°C waktu 7 jam

(a) Kuat tekan beton = 21,6 MPa (b) Kuat tekan beton = 32,96 MPa

4.3.2 Hasil Uji Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Akibat Pembakaran

Hasil dari beton yang dibakar tentu saja mengakibatkan perubahan kuat tekan dan modulus elastisitas. Hasil tersebut terlihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.4.

Tabel 4.2 Nilai Kuat Tekan Beton Akibat Pembakaran

Waktu	Suhu					
	300°C		600°C		900°C	
	21,6 MPa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa
3 jam	14	21,36	8,13	10,40	4,67	5,94
5 jam	13,80	21,22	7,85	8,06	4,39	5,52
7 jam	13,51	20,73	5,52	6,58	3,47	4,67

Pada tabel 4.2 memperlihatkan nilai kuat tekan beton akibat pembakaran pada suhu 300°C, 600°C, dan 900°C selama waktu 3 jam, 5 jam, dan 7 jam untuk tiap-tiap suhu yang ditinjau. Nilai kuat tekan beton sesudah dibakar tentu saja mengalami penurunan, yaitu pada suhu 300°C waktu 3 jam kuat tekan beton menjadi 14 MPa untuk kuat tekan beton tanpa bakar 21,6 MPa.

Tabel 4.3 Prosentase Kekuatan Sisa

Waktu	Suhu					
	300°C		600°C		900°C	
	21,6 MPa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa
3 jam	64,92%	65%	37,70%	31,55%	21,64%	18,03%
5 jam	63,93%	64,38%	36,40%	24,46%	20,33%	16,74%
7 jam	62,60%	63%	25,57%	19,96%	16,06%	14,16%

Pada tabel 4.3 memperlihatkan prosentase kekuatan sisa akibat pembakaran beton. Pada suhu 300°C kuat tekan beton mengalami penurunan berkisar 36%, pada suhu 600°C berkisar 37% pada waktu 3 jam untuk kuat tekan beton 21,6 MPa.

Tabel 4.4 Nilai Modulus Elastisitas Beton Akibat Pembakaran

Waktu	Suhu					
	300°C		600°C		900°C	
	21,6 MPa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa
3 jam	18.097,39	22.168,21	9.382,45	9.471,96	5.079,65	4.076,07
5 jam	17.906,66	21.965,97	9.346,80	8.164,96	4.723,04	3.985,70
7 jam	17.751,74	21.596,14	8.901,02	7.981,96	4.278,08	3.141,27

Pada tabel 4.4 merupakan nilai modulus elastisitas beton setelah dilakukan pembakaran. Nilai modulus elastisitas beton ini sama halnya dengan nilai kuat tekan beton setelah dibakar yaitu mengalami penurunan. Misalnya nilai modulus elastisitas beton normal untuk kuat tekan beton 21,6 MPa adalah 21.842,6 MPa yang dapat dilihat pada tabel 4.1, setelah dibakar pada suhu 900°C selama 3 jam nilainya menjadi 4.076,07 MPa. Jika diamati nilai modulus elastisitas beton ini penurunannya sangat drastis.

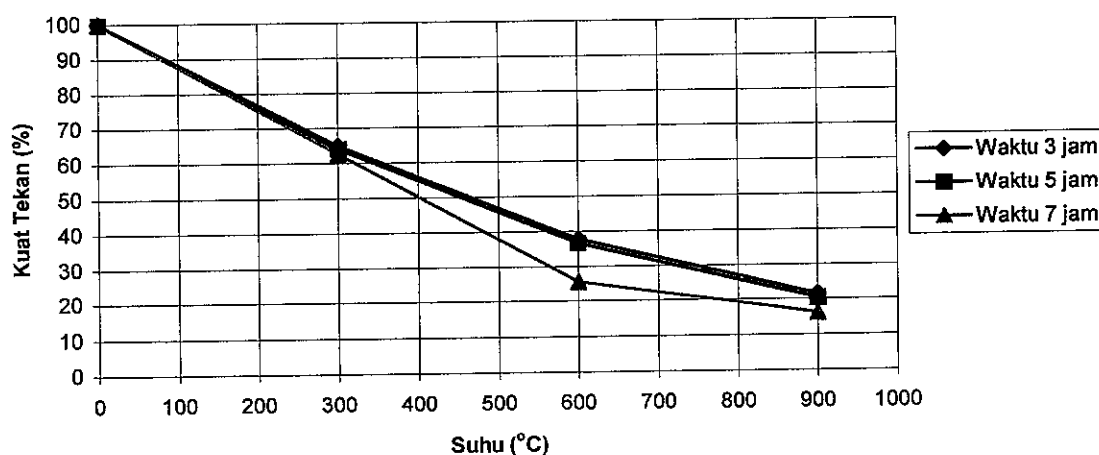
Tabel 4.5 Prosentase Kekuatan Sisa Modulus Elastisitas

Waktu	Suhu					
	300°C		600°C		900°C	
	21,6 MPa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa	21,6 Mpa	32,96MPa
3 jam	82,85%	82,14%	42,95%	35,10%	23,26%	15,10%
5 jam	81,98%	81,40%	42,79%	30,26%	21,62%	14,77%
7 jam	81,27%	80,03%	40,75%	29,58%	19,59%	11,64%

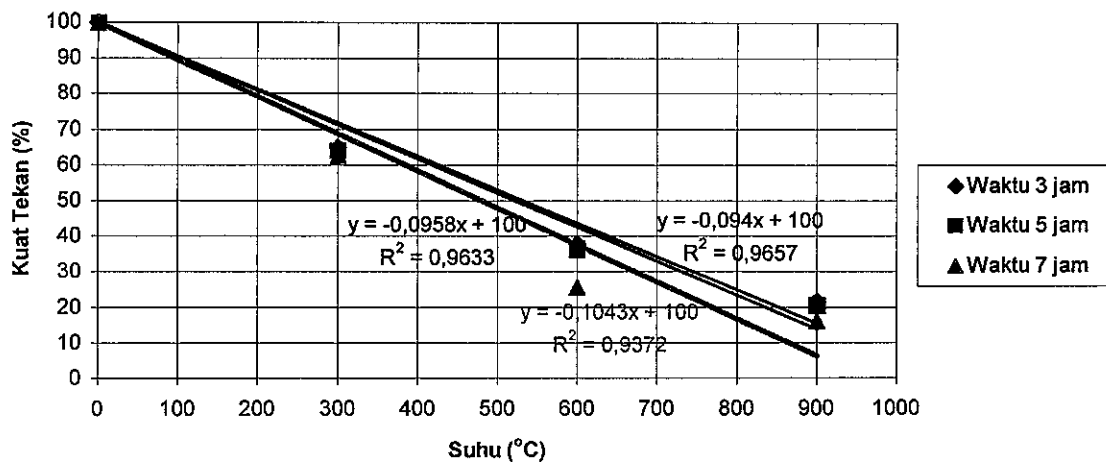
Pada tabel 4.5 memperlihatkan prosentase kekuatan sisa modulus elastisitas beton akibat pembakaran beton selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam pada peningkatan suhu 300°C, 600°C, dan 900°C. Pada suhu 300°C waktu 3 jam untuk kuat tekan beton 21,6 MPa kekuatan sisa modulus elastisitas beton berkisar 82,85%, sedangkan pada suhu 900°C waktu 7 jam dengan kuat tekan beton yang sama kekuatan sisa modulus elastisitas beton menjadi berkisar 19,69%. Tampak bahwa pada saat beton terbakar pada suhu 900°C nilai modulus elastisitas beton mengalami penurunan yang sangat tajam.

4.3.3 Pengaruh Perubahan Suhu

Pada gambar 4.10 tampak perbedaan antara beton yang dibakar pada suhu 300°C, 600°C, 900°C yang dibakar pada waktu yang sama dan hasil regresi penurunan kekuatan tekan beton terhadap suhu dapat dilihat pada gambar 4.11.

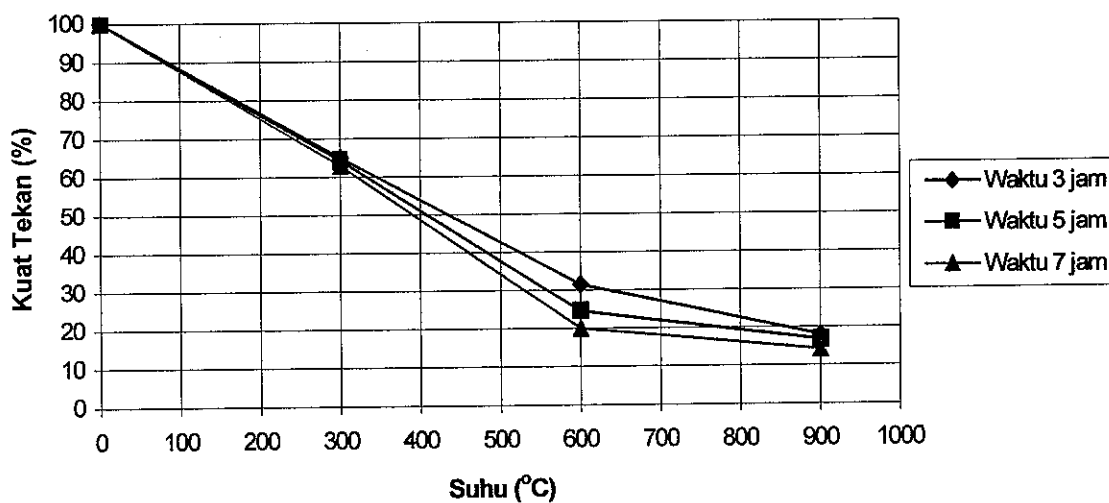


Gambar 4.10 Perubahan Kuat Tekan 21,6 MPa

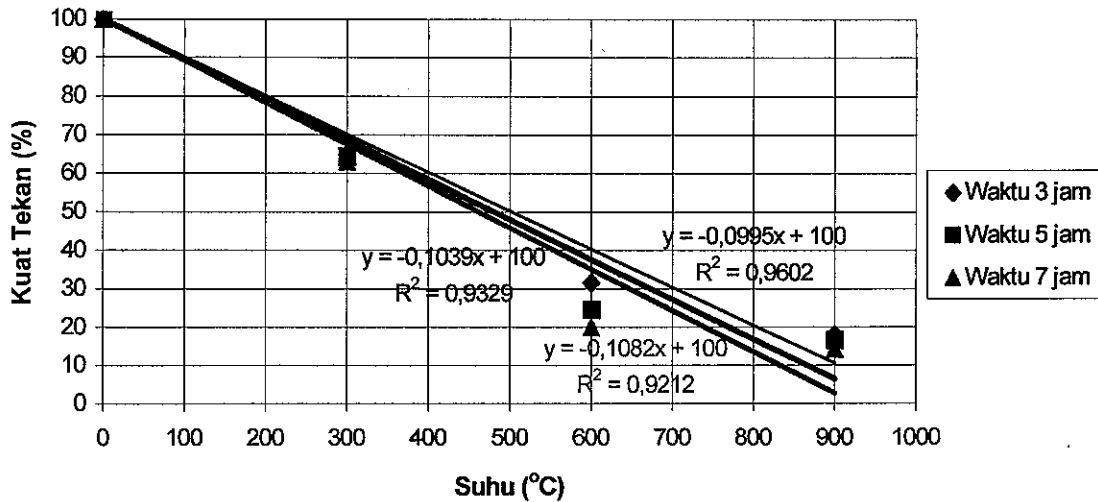


Gambar 4.11 Hasil Regresi Perubahan Kuat Tekan 21,6 MPa

Pada gambar 4.10 tampak bahwa untuk lama waktu pembakaran 3 jam dan 5 jam penurunan kuat tekan beton seiring, sehingga tampak melekat. Sedangkan lama waktu 7 jam penurunan kuat tekan beton berbeda dengan lama waktu 3 jam dan 5 jam, yaitu pada suhu 600°C penurunannya sudah tidak seiring lagi dan pada saat suhu 900°C mulai agak sama lagi. Pada hasil trendline pun juga terjadi hal yang sama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11 yaitu kuat tekan beton untuk lama waktu 3 jam dan 5 jam penurunannya seiring sehingga tampak menempel. Pada lama waktu 7 jam penurunan kuat tekan beton tampak berbeda dari lama waktu yang lain. Dari sini dapat disimpulkan bahwa hasil asli penurunan kuat tekan beton dengan hasil regresi sebenarnya tidak jauh berbeda, hanya saja hasil regresi penurunannya lebih *smooth*.

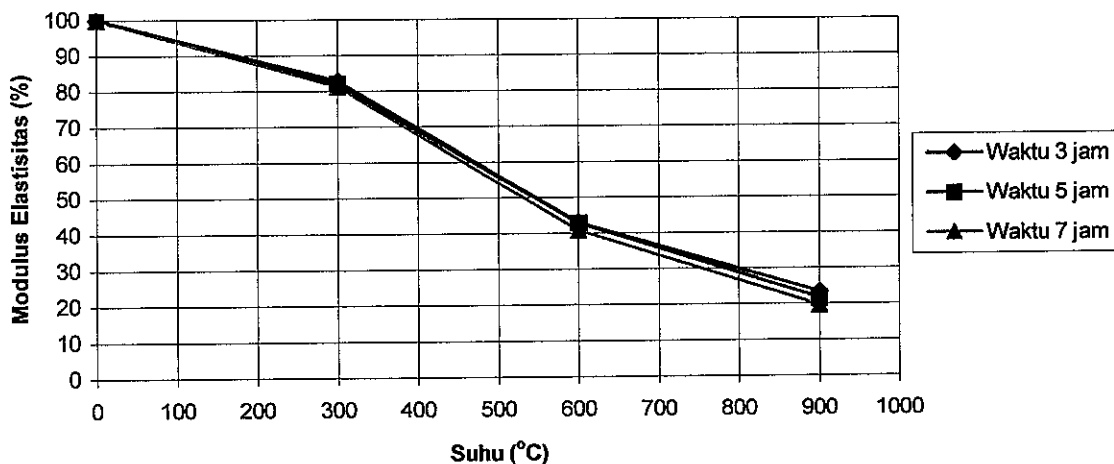


Gambar 4.12 Perubahan Kuat Tekan 32,96 MPa

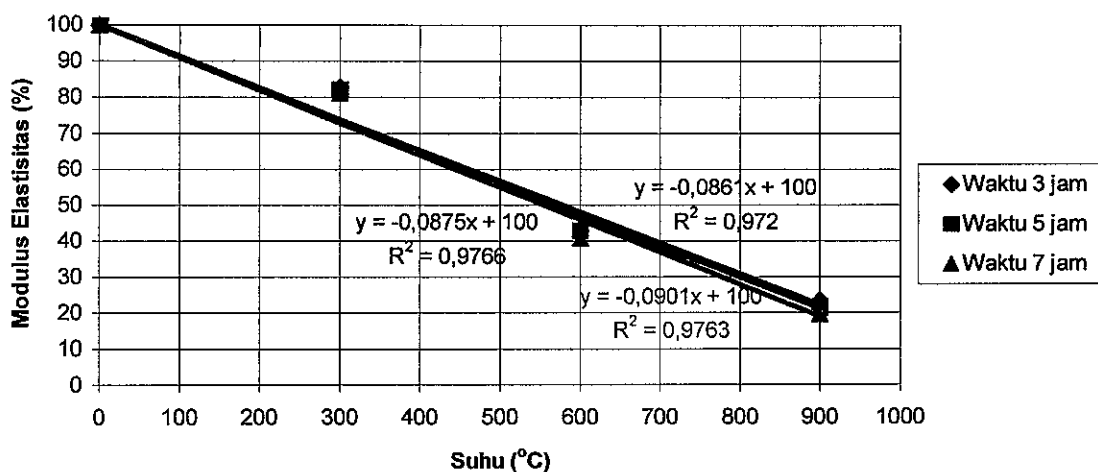


Gambar 4.13 Hasil Regresi Perubahan Kuat Tekan 32,96 MPa

Pada gambar 4.12 ditunjukkan perubahan kuat tekan beton 32,96 MPa, perubahannya dapat dikatakan sejajar satu sama yang lain. Jadi tidak tampak perbedaan yang signifikan pada lama waktu 3 jam, 5 jam, dan 7 jam. Pada saat suhu 300°C ketiga titik lama waktu tampak menempel, pada suhu 600°C, tampak sedikit memisah, dan pada suhu 900°C kembali merapat. Dari hasil regresi perubahan kuat tekan beton 32,96 MPa dapat dilihat pada gambar 4.13. hasil regresinya menunjukkan garis trennya tidak saling berhimpit, tetapi tetap arahnya sejajar.

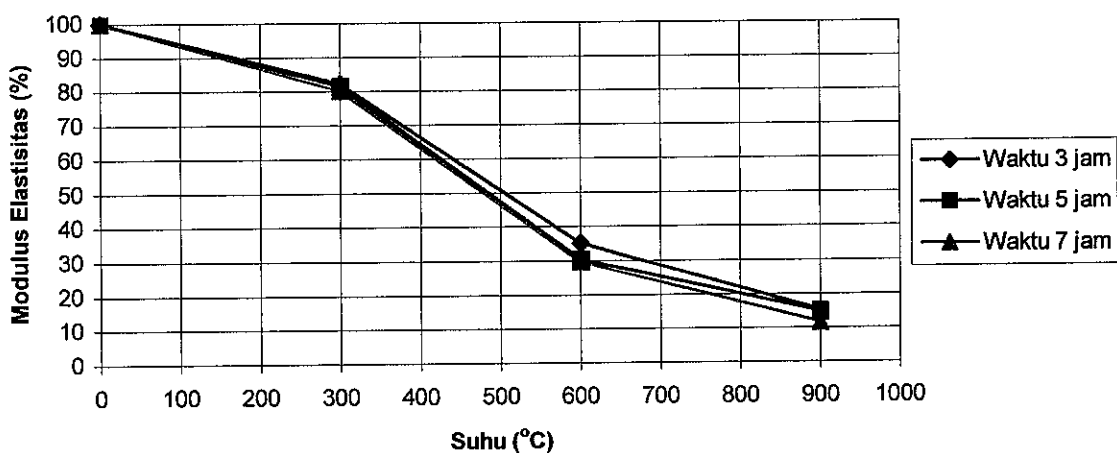


Gambar 4.14 Perubahan Modulus Elastisitas Beton Pada Kuat Tekan Beton 21,6 MPa

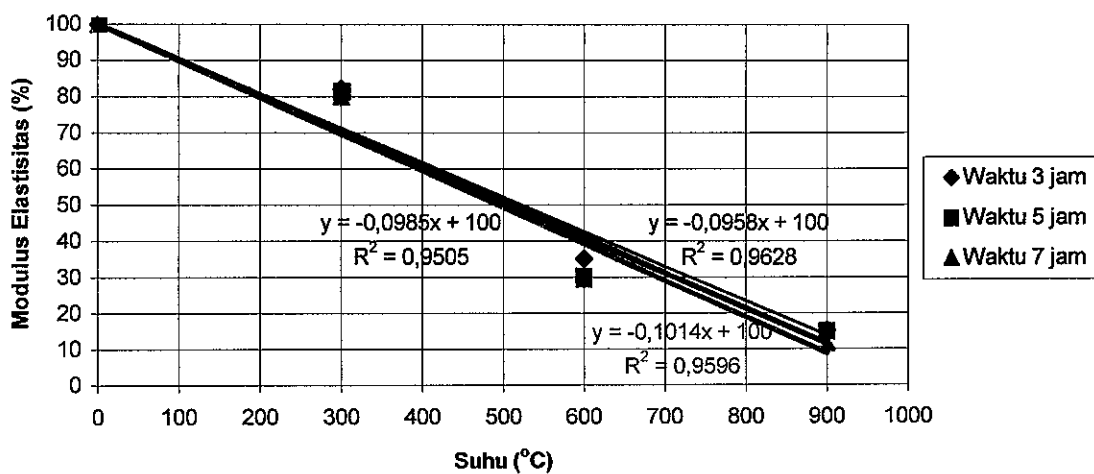


Gambar 4.15 Hasil Regresi Perubahan Modulus Elastisitas Beton Pada Kuat Tekan Beton 21,6 MPa

Perubahan modulus elastisitas beton untuk kuat tekan 21,6 MPa dapat dilihat pada gambar 4.15, dimana hasil perubahannya tampak sejajar bahkan menempel satu dengan yang lain. Pada suhu 300°C tiga titik untuk lama waktu 3 jam, 5 jam dan 7 jam tampak menempel. Pada suhu 600°C tiga titik tersebut masih tampak menempel, tetapi masih tampak meregang dibandingkan pada suhu 300°C. Pada suhu 900°C masih pada kondisi yang sama, tetapi ketiga titik tersebut agak lebih meregang dibandingkan pada suhu 600°C. Pada gambar 4.15 juga dapat dilihat bahwa pada saat mencapai suhu 300°C penurunannya tidak begitu drastis, masih landai. Tetapi pada saat mencapai suhu 600°C tampak penurunannya drastis, dan 900°C landai lagi. Demikian pula halnya pada hasil regresinya yang ditunjukkan pada gambar 4.15, yaitu karena tiap titik menempel maka hasil dari regresinya pun jga demikian. Garis trennya tampak sejajar dan berhimpit tetapi masih dapat dibedakan satu dengan yang lain.



Gambar 4.16 Perubahan Modulus Elastisitas Beton Pada Kuat Tekan Beton 32,96 MPa

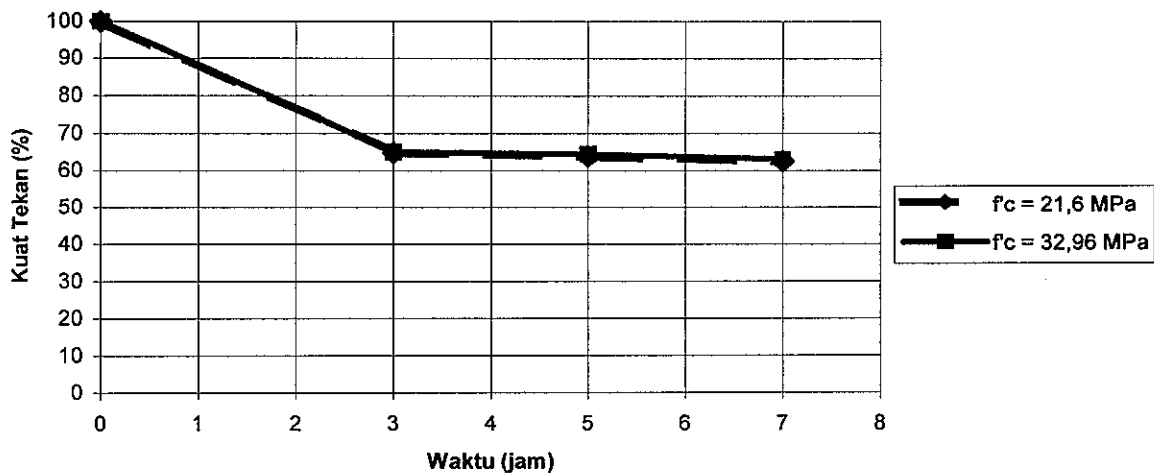


Gambar 4.17 Hasil Regresi Perubahan Modulus Elastisitas Beton Pada Kuat Tekan Beton 32,96 MPa

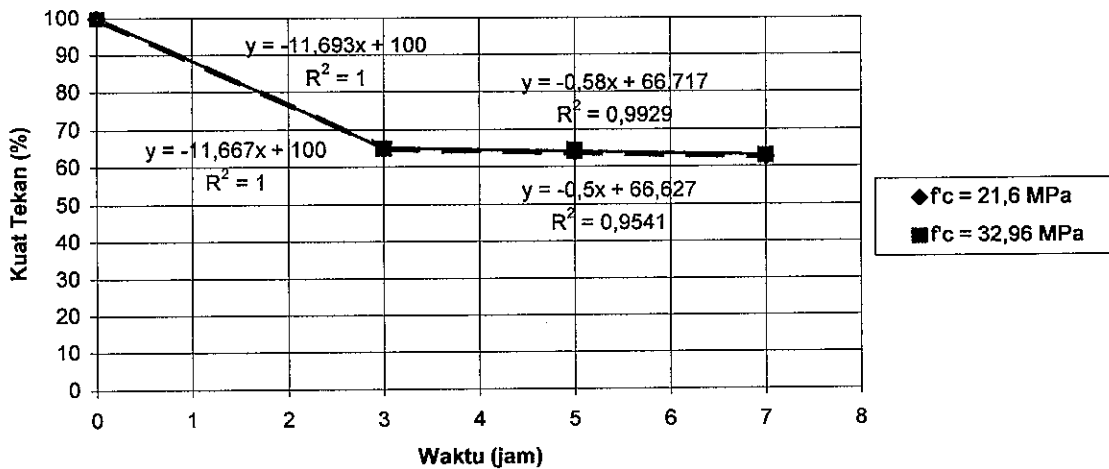
Hasil perubahan modulus elastisitas beton pada kuat tekan beton 32,96 MPa ditunjukkan pada gambar 4.16. Tipe tiga titik yang dihasilkan yaitu untuk lama waktu 3 jam, 5 jam dan 7 jam hampir sama dengan gambar 4.14 yaitu semakin meningkat suhunya maka ketiga titik tersebut semakin meregang. Hanya saja terdapat perbedaan pada titik untuk lama waktu 5 jam, pada suhu 600°C titik tersebut menempel pada titik untuk lama waktu 7 jam dan pada suhu 900°C menempel pada titik untuk lama waktu 3 jam. Hasil regresi yang ditunjukkan pada gambar 4.17 juga mirip dengan gambar 4.15 dimana garis trennya sejajar dan hampir menempel.

4.3.4 Pengaruh Lamanya Pembakaran

Selain suhu yang membedakan hasil pembakaran, waktu/lamanya pembakaran juga dapat mempengaruhi hasil pembakaran. Meskipun suhu kebakaran sama namun terkadang bisa juga lamanya kebakaran berbeda, hal ini bisa saja disebabkan karena sulitnya pemadam kebakaran menjangkau lokasi kebakaran. Maka perlu dilakukan penelitian adanya pengaruh lamanya pembakaran. Pada penelitian ini waktu yang ditinjau adalah 3 jam, 5 jam, dan 7 jam.

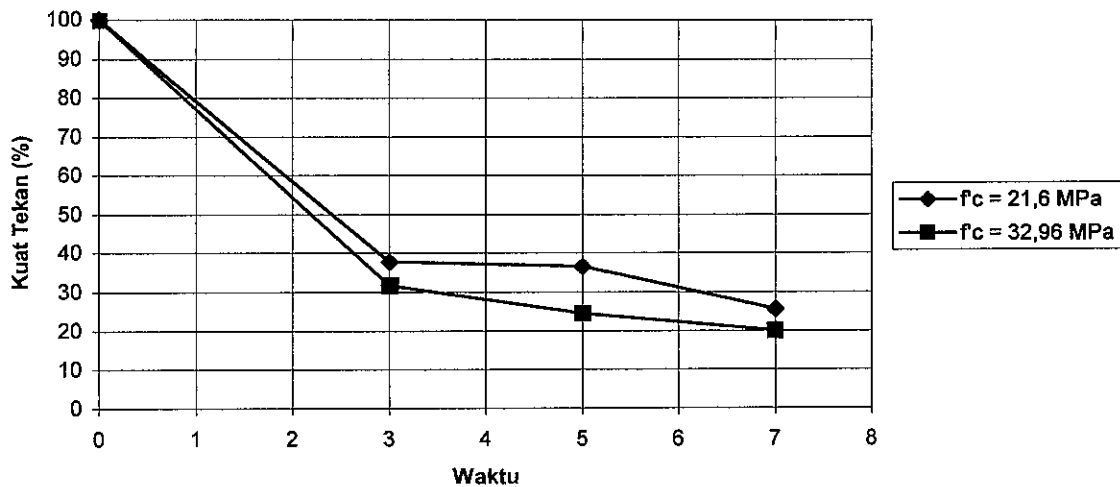


Gambar 4.18 Perubahan Kuat tekan Beton pada suhu 300°C

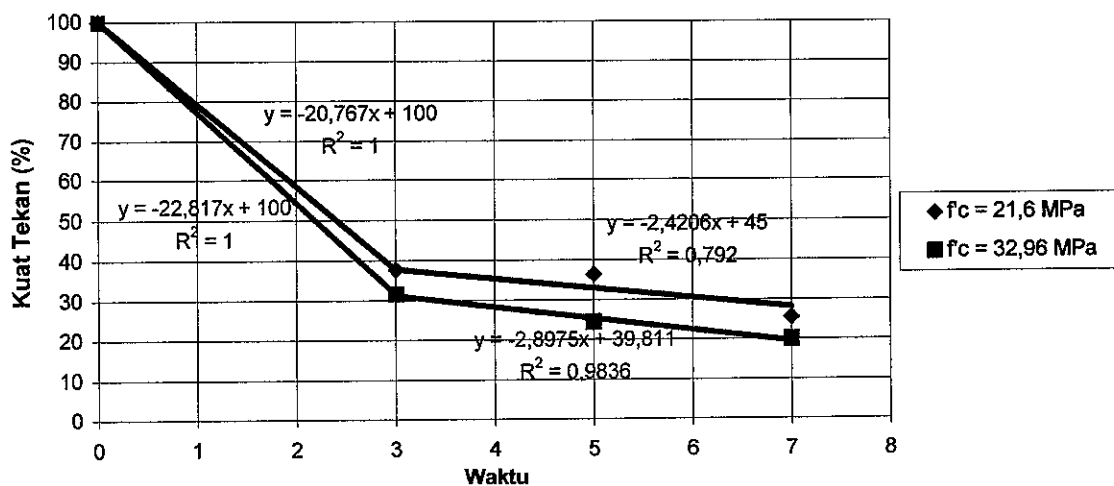


Gambar 4.19 Hasil Regresi Perubahan Kuat tekan Beton pada suhu 300°C

Pada gambar 4.18 yaitu perubahan kuat tekan beton pada suhu 300°C, menunjukkan bahwa beton yang dibakar pada lama waktu 3 jam, 5 jam dan 7 jam tidak begitu tampak perbedaan yang signifikan, sehingga hanya pada saat mencapai lama waktu 3 jam terjadi penurunan yang drastis. Pada hasil regresi yang ditunjukkan pada gambar 4.19 garis tern menunjukkan penurunan yang tidak begitu tajam, masih dalam taraf landai. Dari kedua gambar 4.18 dan 4.19 juga dapat dilihat bahwa tidak terdapat perbedaan yang berarti untuk kuat tekan beton 21,6 MPa dan kuat tekan beton 32,96 MPa, bahkan hampir menempel.

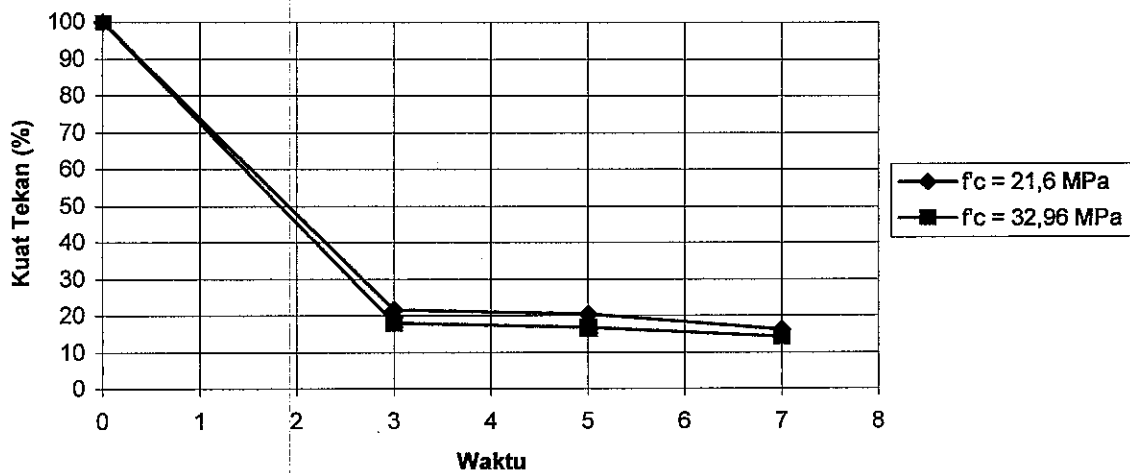


Gambar 4.20 Perubahan Kuat tekan Beton pada suhu 600°C

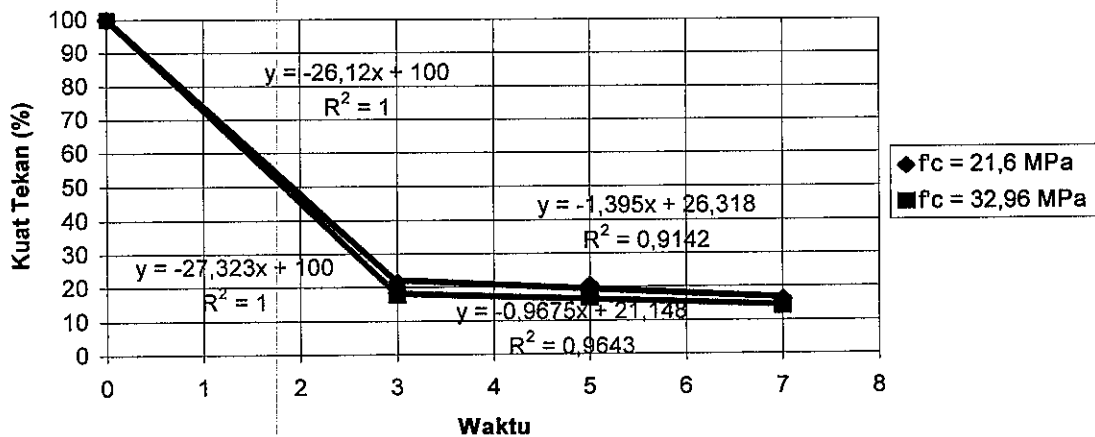


Gambar 4.21 Hasil Regresi Perubahan Kuat tekan Beton pada suhu 600°C

Gambar 4.20 menunjukkan perubahan kuat tekan beton pada suhu 600°C, pada gambar dapat dilihat selalu terjadi penurunan yang drastis pada saat mencapai lama waktu 3 jam, hal ini menunjukkan bahwa beton yang dibakar dengan yang tidak dibakar tampak sekali perbedaannya. Pada gambar 4.20 perubahan kuat tekan beton 21,6 MPa dengan kuat tekan beton 32,96 MPa terjadi perbedaan yaitu pada lama waktu 5 jam kuat tekan beton 21,6 MPa penurunannya lebih landai dari pada saat pencapaian lama waktu 7 jam. Untuk kuat tekan beton 32,96 MPa kebalikannya yaitu saat mencapai lama dari 5 jam ke 7 jam lebih landai dibandingkan saat mencapai waktu 5 jam. Hasil regresi yang ditunjukkan pada gambar 4.21 memperlihatkan bahwa garis tren yang dihasilkan tampak menurun tajam, sehingga pada saat mencapai lama waktu 7 jam hampir mendekati nol terutama untuk kuat tekan beton 32,96 MPa. Pada gambar 4.21 ini 2 kuat tekan beton yang dimunculkan tampak perbedaannya, tetapi penurunannya masih tetap sejajar.

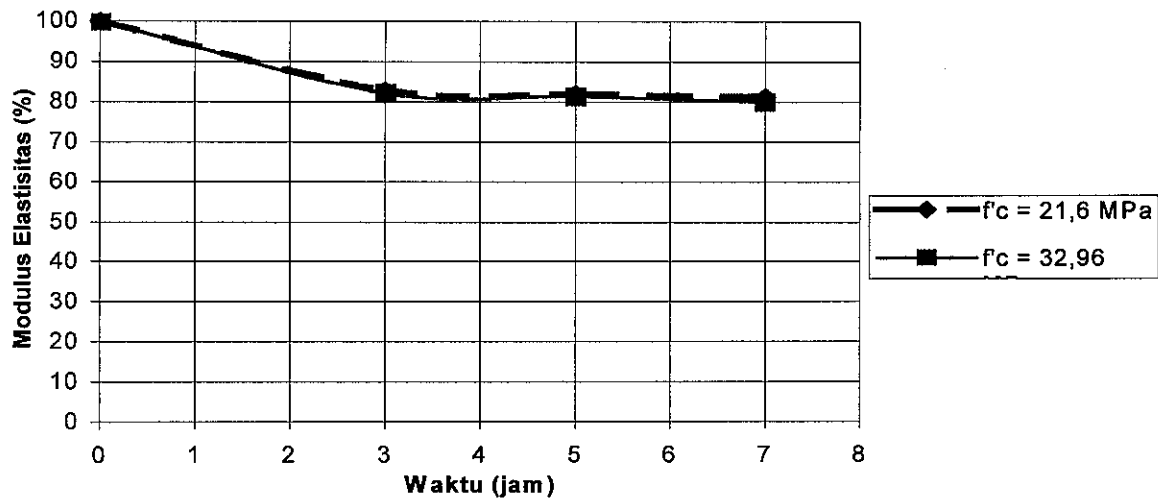


Gambar 4.22 Perubahan Kuat tekan Beton pada suhu 900°C

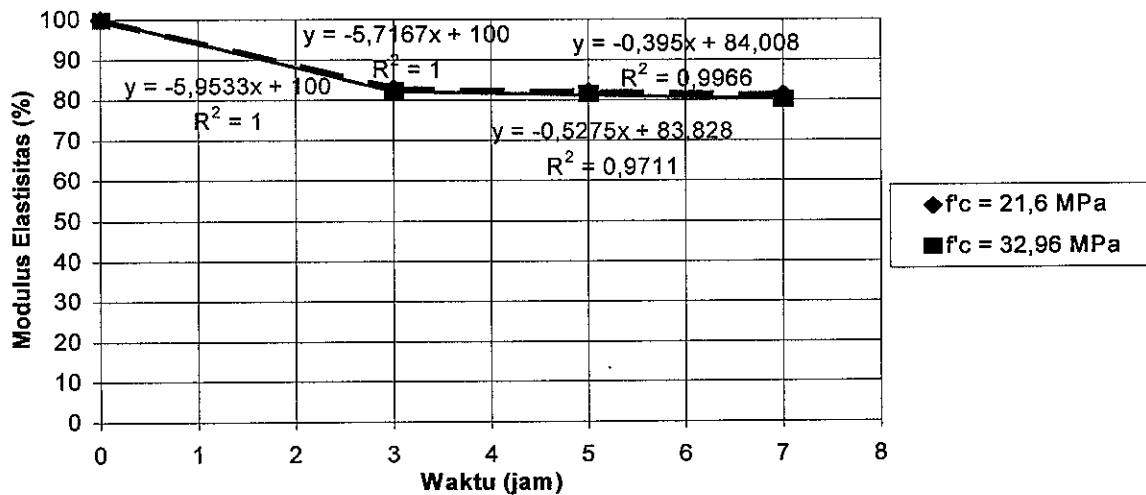


Gambar 4.23 Hasil Regresi Perubahan Kuat tekan Beton pada suhu 900°C

Perubahan kuat tekan beton pada suhu 900°C ditunjukkan pada gambar 4.22, pada 2 kuat tekan beton yang ditampilkan tidak terdapat perbedaan yang berarti, masih tetap penurunannya sejajar. Pada lama waktu 3 jam terjadi penurunan yang drastis dan pada lama waktu mencapai 5 jam dan 7 jam penurunannya landai. Pada hasil regresinya pun juga mirip, yaitu tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara 2 kuat tekan beton yang ditampilkan yang dapat dilihat pada gambar 4.23. Pada gambar 4.23 ini garis tren yang dihasilkan sangat turun tajam, sehingga beton yang dihasilkan pada pembakaran 900°C sebelum 7 jam sudah tidak memiliki kekuatan.

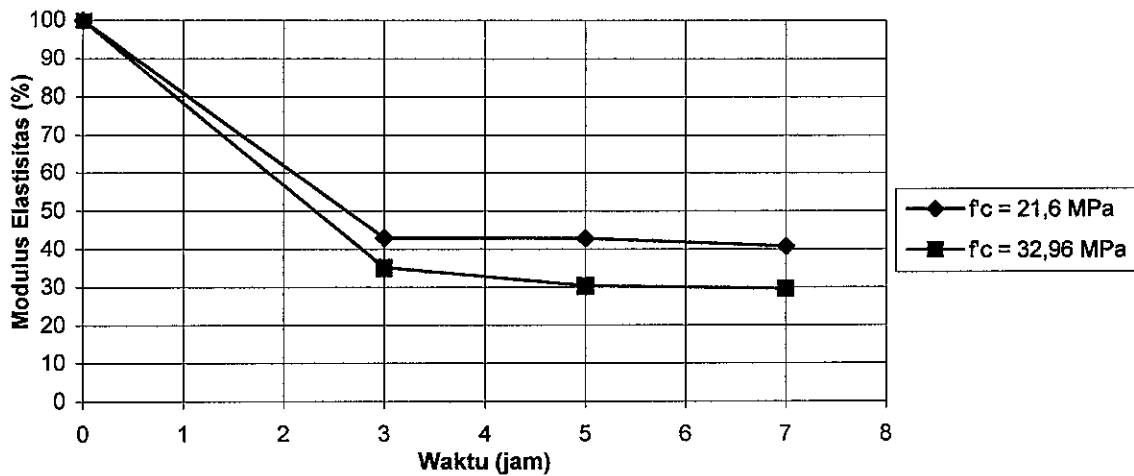


Gambar 4.24 Perubahan Modulus Elastisitas Beton pada suhu 300°C

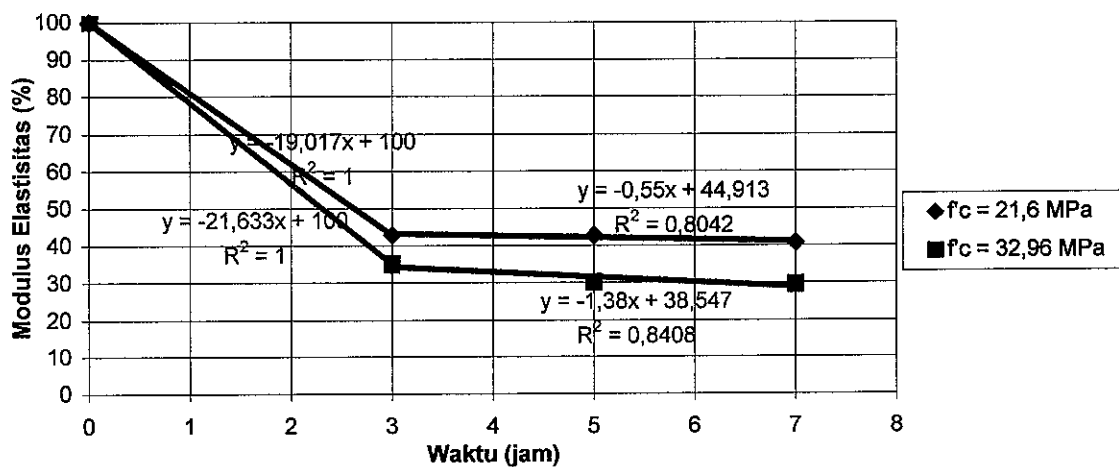


Gambar 4.25 Hasil Regresi Perubahan Modulus Elastisitas Beton pada suhu 300°C

Gambar 4.24 dan 4.25 merupakan perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 300°C, dari 2 gambar tersebut dimana untuk gambar 4.24 merupakan hasil asli dan 4.25 merupakan hasil regresi menunjukkan bahwa perubahan modulus elastisitas beton untuk kuat tekan beton 21,6 MPa dan 32,96 MPa tidak terdapat perbedaan yang berarti karena hasil dari garisnya menempel. Dua garis yang dihasilkan pun tidak terjadi penurunan yang drastis, sehingga dapat disimpulkan bahwa beton yang dibakar pada suhu 300°C tidak terjadi perubahan yang signifikan dengan beton yang tanpa dibakar.

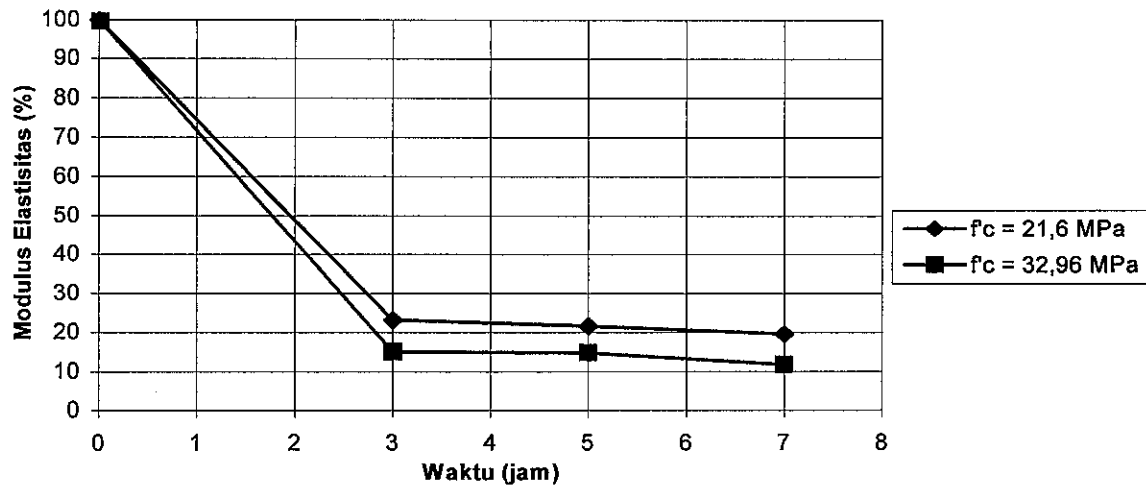


Gambar 4.26 Perubahan Modulus Elastisitas Beton pada suhu 600°C

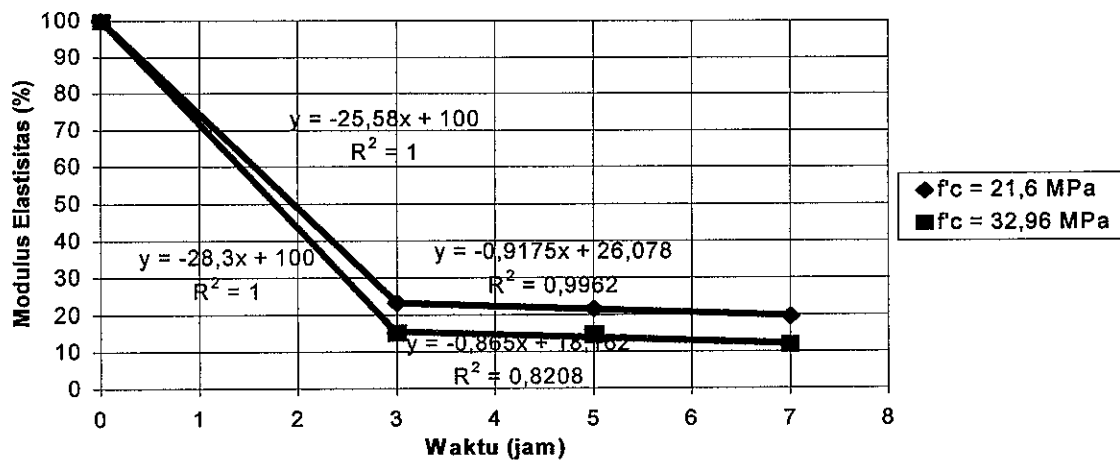


Gambar 4.27 Hasil Regresi Perubahan Modulus Elastisitas Beton pada suhu 600°C

Pada gambar 4.26 menunjukkan perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 600°C. Pada saat beton terbakar mencapai waktu 3 jam terdapat penurunan yang drastis, saat mencapai waktu 5 jam hampir tidak ada penurunan sehingga tampak garisnya datar, saat mencapai waktu 7 jam terjadi penurunan lagi tapi tidak begitu besar, hal ini untuk kuat tekan beton 21,6 MPa. Untuk kuat tekan beton 32,96 MPa yang terjadi kebalikan dari kuat tekan beton 21,6 MPa, yaitu saat mencapai lama waktu 5 jam tampak terjadi penurunan sedangkan saat mencapai 7 jam tidak terdapat penurunan yang berarti. Pada garis tren yang ditunjukkan pada gambar 4.27 terjadi perbedaan penurunan antara 2 kuat tekan beton, tetapi penurunannya masih tetap sejajar.



Gambar 4.28 Perubahan Modulus Elastisitas Beton pada suhu 900°C



Gambar 4.29 Hasil Regresi Perubahan Modulus Elastisitas Beton pada suhu 900°C

Perubahan modulus elastisitas beton pada suhu 900°C ditunjukkan pada gambar 4.28, seperti halnya pada gambar sebelumnya pada saat mencapai lama waktu 3 jam terjadi penurunan yang cukup drastis, untuk lama waktu berikutnya yaitu 5 jam dan 7 jam terjadi sedikit penurunan. Meskipun demikian tetap tampak perbedaan penurunan antara 2 kuat tekan beton 21,6 MPa dan 32,96 MPa tetapi tidak terlalu jauh dan penurunannya pun sejajar. Pada gambar regresi yang ditunjukkan pada gambar 4.29 tren garis yang dihasilkan penurunannya cukup tajam sehingga beton yang dibakar sebelum mendekati lama waktu 7 jam sudah tidak memiliki nilai modulus elastisitas beton.

Pada grafik pengaruh lamanya pembakaran bisa diketahui pada perilaku beton dengan kuat tekan beton 21,6 MPa dan 32,96 MPa. Pada grafik menunjukkan bahwa kuat tekan beton 32,96 MPa memiliki kecenderungan penurunannya lebih besar daripada kuat tekan beton 21,6 MPa meskipun dilakukan pembakaran pada suhu dan lama waktu yang sama. Hal ini

disebabkan karena nilai faktor air semen, dimana faktor air semen yang semakin kecil maka jika terkena temperatur tinggi nilai kehilangan kekuatannya semakin meningkat. Seperti halnya dikatakan Neville (1975) bahwa tes pada kuat tekan beton mutu tinggi (89 MPa) paska bakar memperlihatkan rata-rata kehilangannya lebih tinggi daripada beton mutu normal. Faktor utama yang membedakan kuat tekan beton adalah faktor air semen, sehingga bisa dikatakan bahwa beton mutu tinggi yang memiliki faktor air semen lebih kecil daripada beton mutu normal, paska bakar rata-rata kehilangannya lebih tinggi.

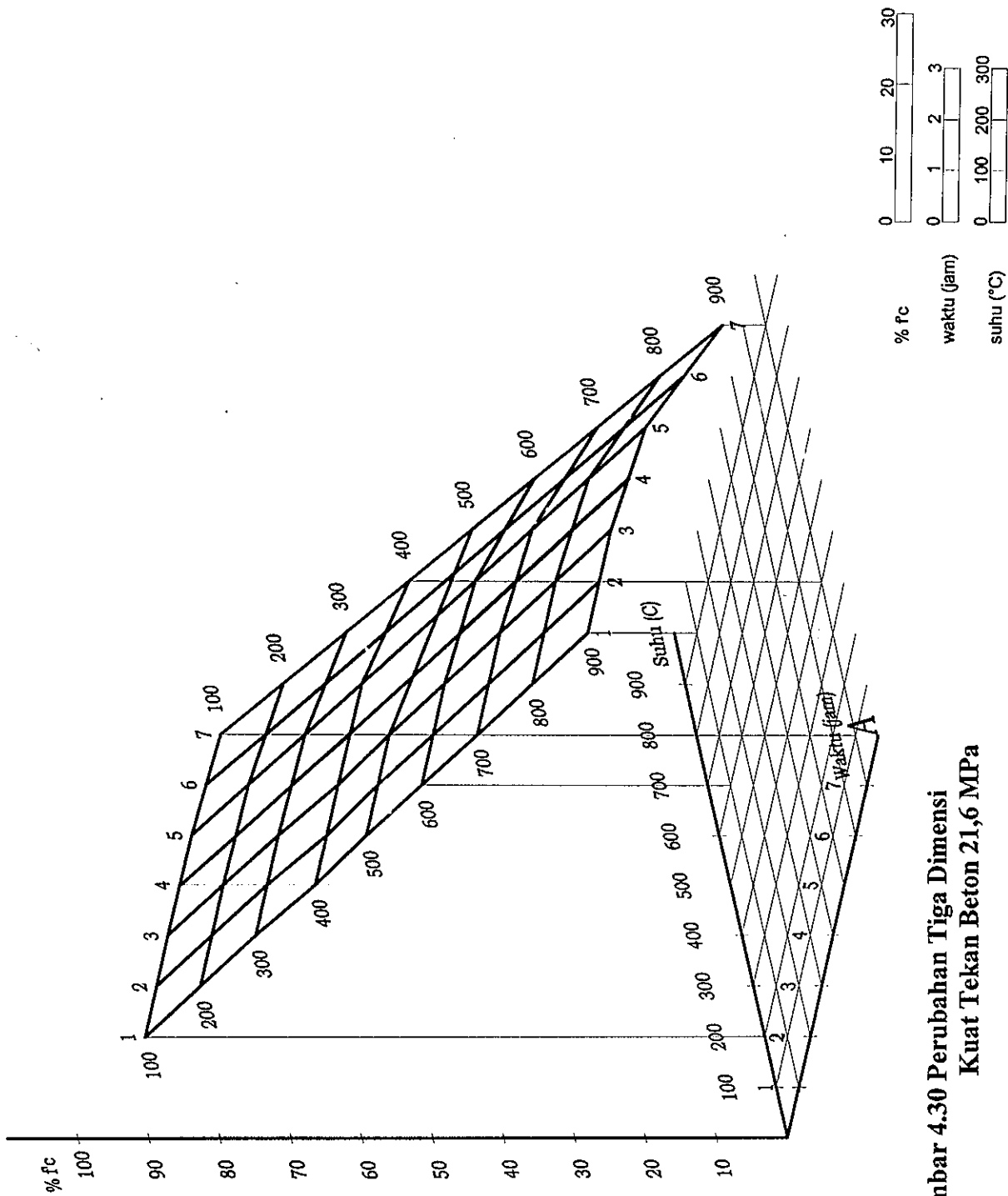
Pada grafik-grafik tersebut untuk mencari bentuk hubungan dari kedua variabel dilakukan dengan analisa regresi. Sebelum memutuskan bentuk hubungan kedua variabel, dilakukan tebaran titik-titik dari pasangan nilai kedua variabel itu untuk memperoleh pola kecenderungan dari datanya. Karena tebaran dari titik sebagaimana tampak pada grafik di atas menunjukkan adanya kecenderungan hubungan linier, sehingga digunakan analisa regresi linier. Oleh karena pada setiap grafik menunjukkan kecenderungan hubungan linier, maka pada semua grafik dilakukan regresi linier.

4.3.1 Pengaruh Perubahan Kuat Tekan Beton

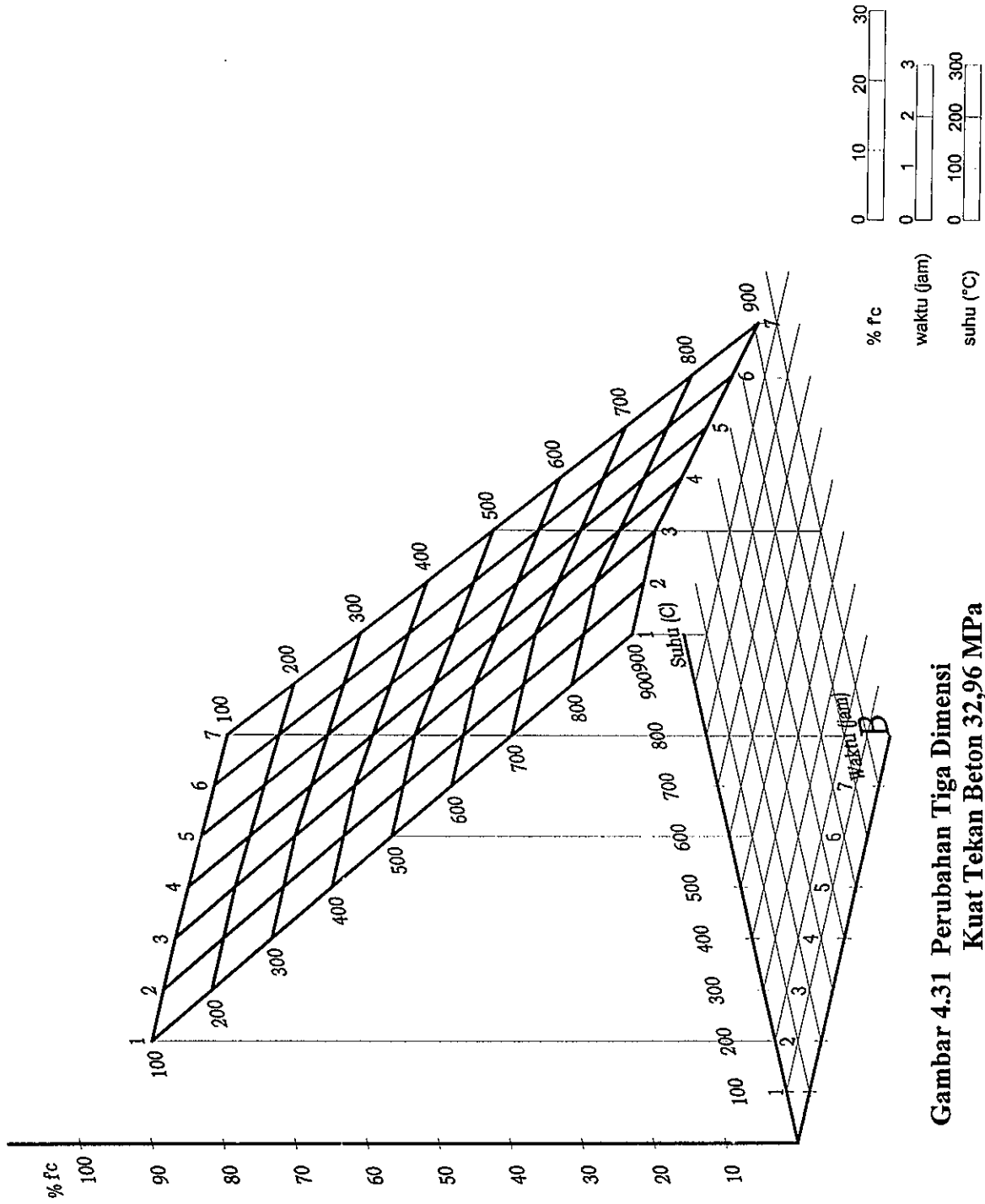
Pada tujuan penelitian ini salah satu diantaranya adalah untuk mengetahui perbedaan dengan digunakannya dua kuat tekan beton, maka pada gambar 4.18 dan gambar 4.29 dapat diketahui hasilnya, yaitu beton dengan kuat tekan 21,6 MPa dan 32,96 MPa tidak begitu nampak perbedaan yang signifikan, sehingga bisa juga tidak perlu dibuat grafik untuk tiap-tiap kuat tekan beton untuk mengetahui perubahannya.

4.3.2 Bentuk Grafik Tiga Dimensi dan Tabel

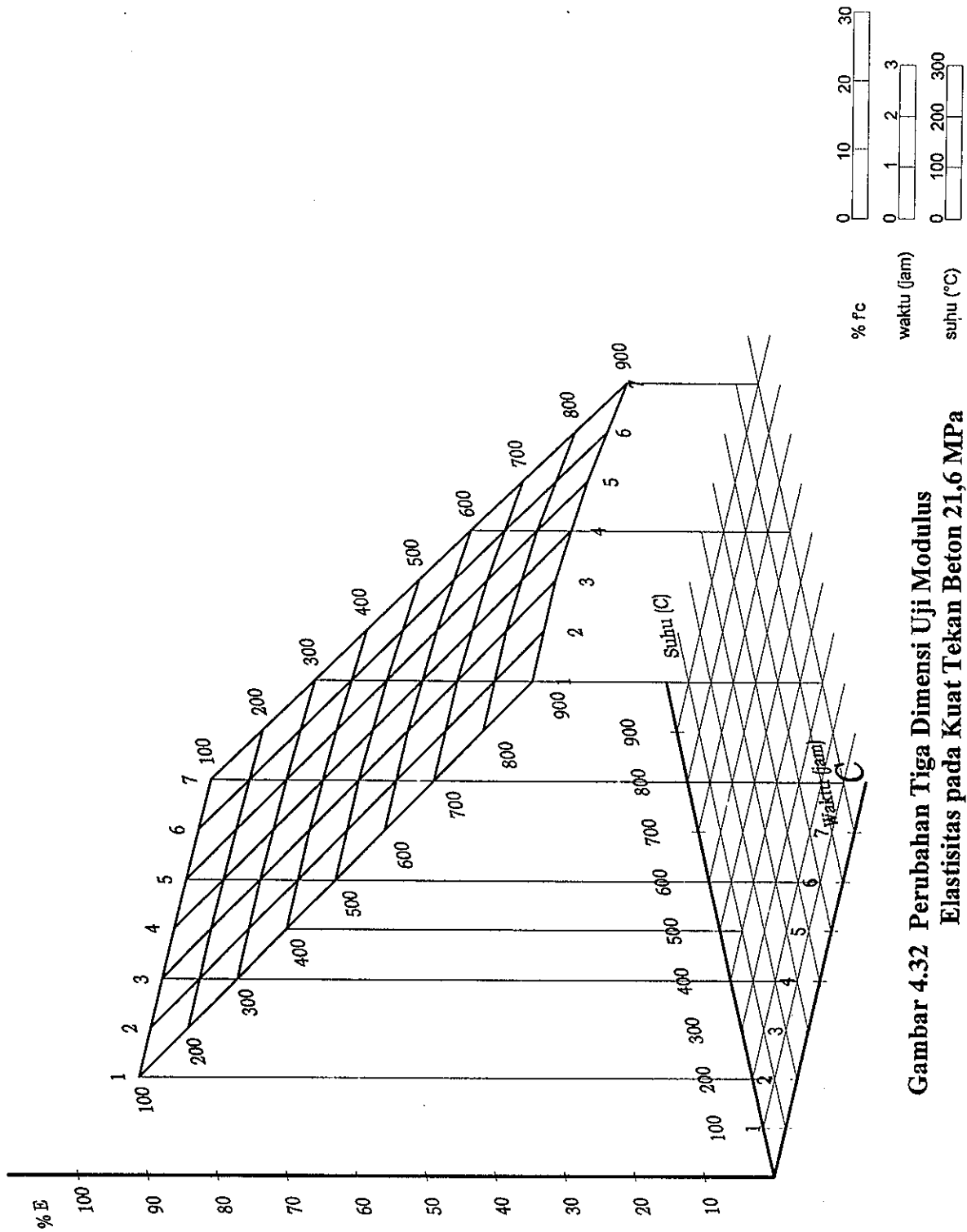
Hasil dari penelitian ini tentunya ada yang berupa grafik dua dimensi seperti pada gambar mulai dari gambar 4.10 sampai dengan 4.29, namun untuk kemudahan mendapatkan perubahan kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton dengan berbagai variasi maka dibuat dalam bentuk tiga dimensi, dimana hasil tiga dimensi ini merupakan kumpulan dari regresi dua dimensi sehingga grafik yang ada tidak berasal dari regresi yang berbeda. Untuk ketelitian nilai dari perubahan kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton maka dibuat dalam bentuk tabel yaitu pada tabel 4.6 dan tabel 4.7, dimana bisa langsung diperoleh nilai perubahannya.



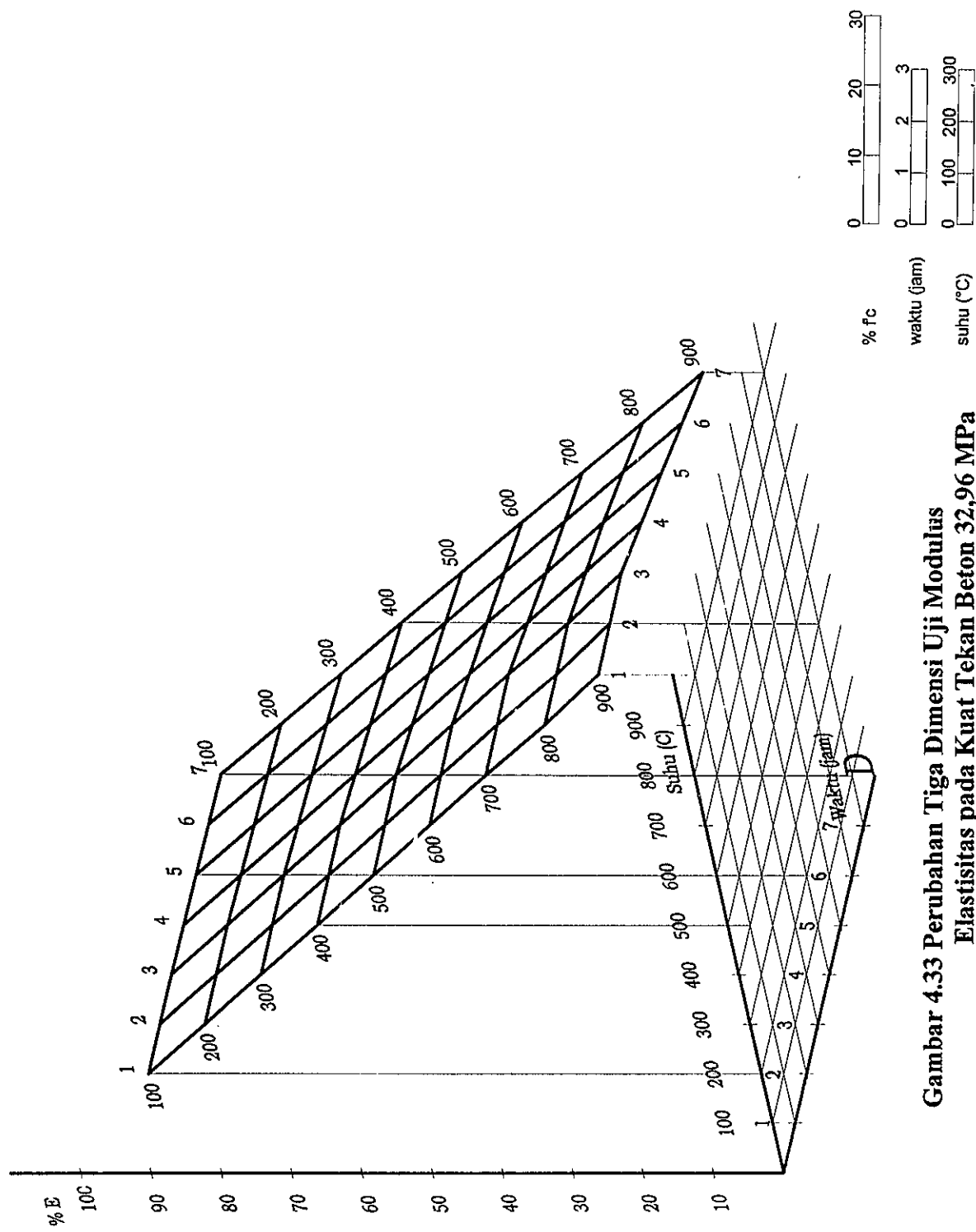
**Gambar 4.30 Perubahan Tiga Dimensi
Kuat Tekan Beton 21,6 MPa**



**Gambar 4.31 Perubahan Tiga Dimensi
Kuat Tekan Beton 32,96 MPa**



Gambar 4.32 Perubahan Tiga Dimensi Uji Modulus Elastisitas pada Kuat Tekan Beton 21,6 MPa



Gambar 4.33 Perubahan Tiga Dimensi Uji Modulus Elastisitas pada Kuat Tekan Beton 32,96 MPa

Tabel 4.6 Perubahan Kuat Tekan (%)

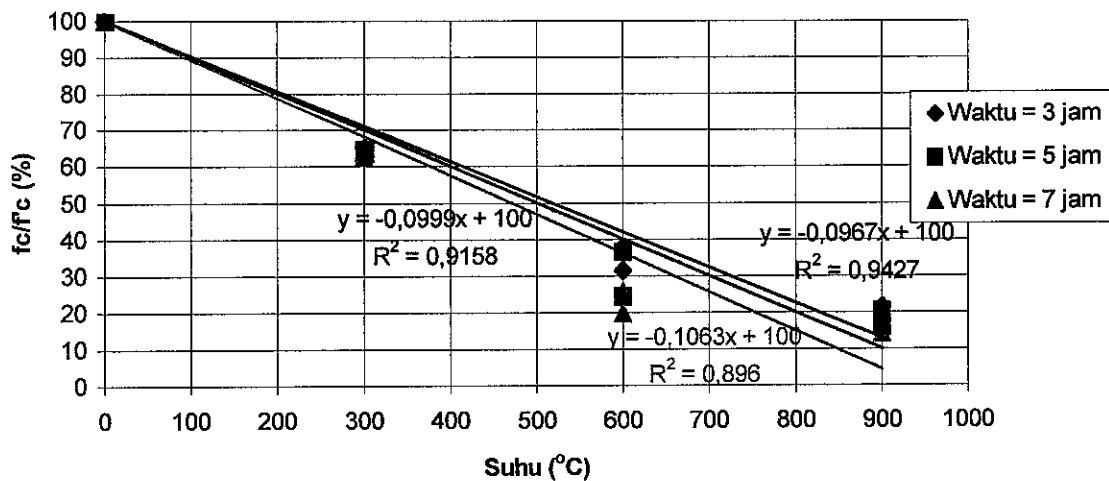
Suhu (°C)	Waktu (jam)											
	3		5		7		9					
	21,6 MPa	32,96 MPa	21,6 MPa	32,96 MPa	21,6 MPa	32,96 MPa	21,6 MPa	32,96 MPa				
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
100	90,6	90,05	90,42	89,61	89,57	89,18	89,27	88,74				
200	81,2	80,1	80,84	79,22	79,14	78,36	78,54	77,48				
300	71,8	70,15	71,26	68,83	68,71	67,54	67,81	66,22				
400	62,4	60,2	61,68	58,44	58,28	56,72	57,08	54,96				
500	53	50,25	52,1	48,05	47,85	45,9	46,35	43,7				
600	43,6	40,3	42,52	37,66	37,42	35,08	35,62	32,44				
700	34,2	30,35	32,94	27,27	26,99	24,26	24,89	21,18				
800	24,8	20,4	23,36	16,88	16,56	13,44	14,16	9,92				
900	15,4	10,45	13,78	6,49	6,13	2,62	3,43	-				
1000	6	0,5	4,2	-	-	-	-	-				

Tabel 4.7 Perubahan Modulus Elastisitas (%)

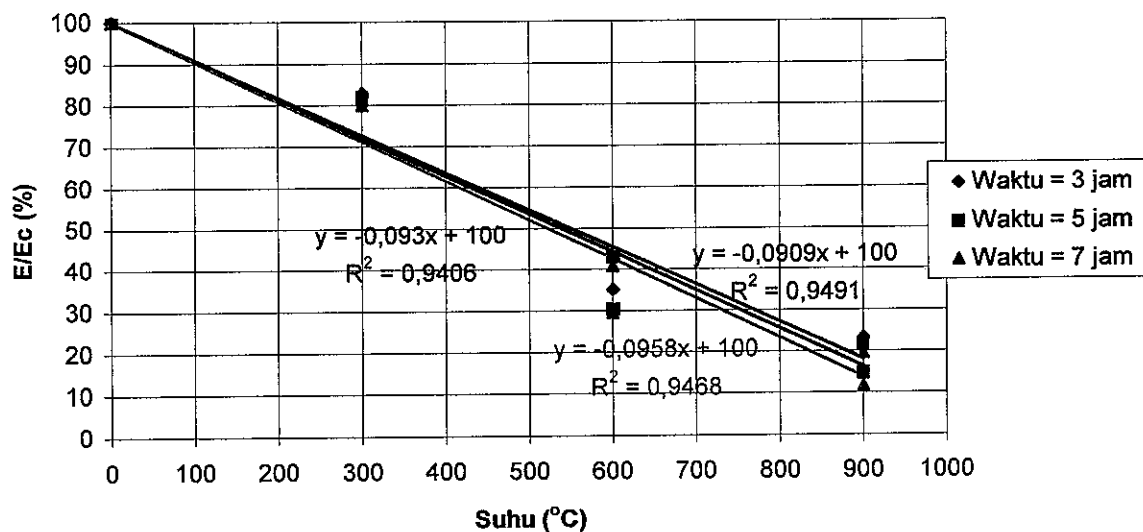
Suhu (°C)	Waktu (Jam)											
	3		5		7		9					
	21,6 MPa	32,96 MPa	21,6 MPa	32,96 MPa	21,6 MPa	32,96 MPa	21,6 MPa	32,96 MPa				
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
100	91,39	90,42	91,25	90,15	90,99	89,86	90,81	89,58	89,58	89,58	89,58	
200	82,78	80,84	82,5	80,3	81,98	79,72	81,62	79,16	79,16	79,16	79,16	
300	74,17	71,26	73,75	70,45	72,97	69,58	72,43	68,74	68,74	68,74	68,74	
400	65,56	61,68	65	60,6	63,96	59,44	63,24	58,32	58,32	58,32	58,32	
500	56,95	52,1	56,25	50,75	54,95	49,3	54,05	47,9	47,9	47,9	47,9	
600	48,34	42,52	47,5	40,9	45,94	39,16	44,86	37,48	37,48	37,48	37,48	
700	39,73	32,94	38,75	31,05	36,93	29,02	35,67	27,06	27,06	27,06	27,06	
800	31,12	23,36	30	21,2	27,92	18,88	26,48	16,64	16,64	16,64	16,64	
900	22,51	13,78	21,25	11,35	18,91	8,74	17,29	6,22	6,22	6,22	6,22	
1000	13,9	4,2	12,5	1,5	9,9	-	8,1	-	-	-	-	

4.4 Normalisasi Kuat Tekan Beton

Adanya dua kuat tekan beton yaitu 21,6 MPa dan 32,96 MPa terkadang sedikit menyulitkan jika dibutuhkan selain dua kuat tekan beton tersebut, perlu dilakukan interpolasi ataupun ekstrapolasi. Meskipun jika dilihat tidak terlalu beda jauh antara kuat tekan beton 21,6 MPa dengan 32,96 MPa. Tetapi akan lebih baik jika benar-benar diperoleh angka yang sesuai. Maka pada penelitian ini dibuat grafik normalisasi, sehingga dalam satu grafik ini bisa digunakan untuk semua kuat tekan beton. Pada gambar 4.34 menunjukkan perubahan kuat tekan beton yang dinormalisasi demikian juga untuk gambar 4.35 untuk perubahan modulus elatisitas betonnya.



Gambar 4.34 Normalisasi perubahan kuat tekan beton



Gambar 4.35 Normalisasi perubahan modulus elastisitas beton

Format hasil normalisasi ini juga dapat dibuat dalam bentuk tabel, sehingga bisa lebih cepat diperoleh nilai perubahannya yang ditunjukkan pada tabel 4.8 dan tabel 4.9.

Tabel 4.8 Perubahan Kuat Tekan Beton dengan Normalisasi (%)

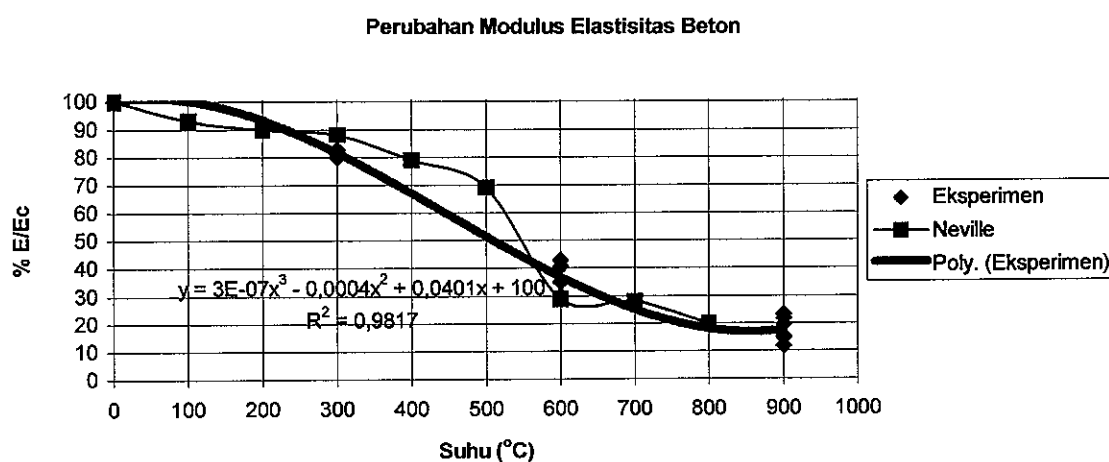
Suhu (°C)	Waktu (jam)			
	3	5	7	9
0	100	100	100	100
100	90,33	90,01	89,37	89
200	80,66	80,02	78,74	78
300	70,99	70,03	68,11	67
400	61,32	60,04	57,48	56
500	51,65	50,05	46,85	45
600	41,98	40,06	36,22	34
700	32,31	30,07	25,59	23
800	22,64	20,08	14,96	12
900	12,97	10,09	4,33	1
1000	3,3	0,1	-	-

Tabel 4.9 Perubahan Modulus Elastisitas dengan Normalisasi (%)

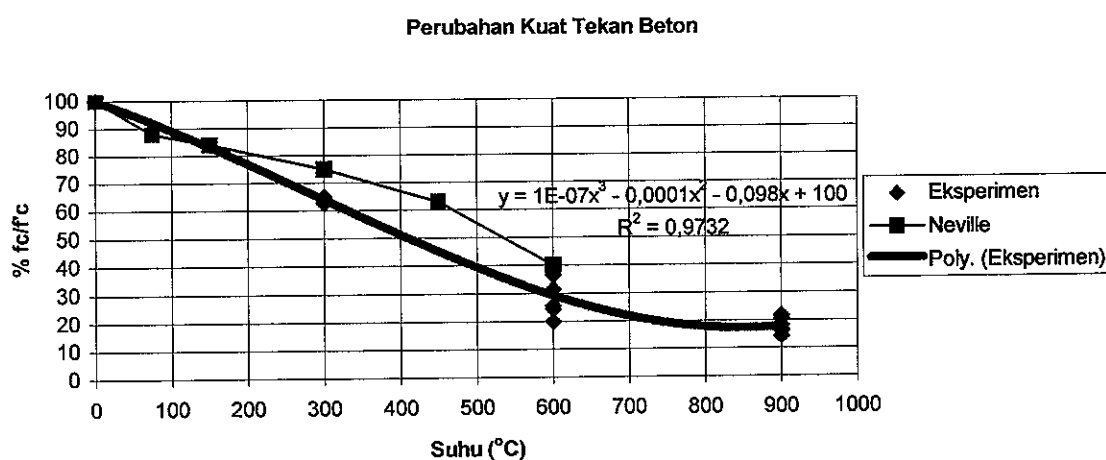
Suhu (°C)	Waktu (jam)			
	3	5	7	9
0	100	100	100	100
100	90,91	90,7	90,42	90,19
200	81,82	81,4	80,84	80,38
300	72,73	72,1	71,26	70,57
400	63,64	62,8	61,68	60,76
500	54,55	53,5	52,1	50,95
600	45,46	44,2	42,52	41,14
700	36,37	34,9	32,94	31,33
800	27,28	25,6	23,36	21,52
900	18,19	16,3	13,78	11,71
1000	9,1	7	4,2	1,9

4.3 Hasil Grafik Eksperimen Dibandingkan Dengan Grafik Neville

Hasil grafik modulus elastisitas beton, sebenarnya jika diregresi secara polynomial menghasilkan garis tren yang tidak jauh berbeda dari grafik Neville, demikian pula untuk nilai kuat tekan betonnya. Sehingga dapat dikatakan bahwa hasil dari penelitian tidak menyimpang dari grafik-grafik yang sudah ada. Pada gambar 4.36 dan 4.37 dapat dilihat perbandingannya.



Gambar 4.36 Perbandingan nilai modulus elastisitas beton Neville dan eksperimen



Gambar 4.37 Perbandingan nilai kuat tekan beton Neville dan eksperimen

Hasil regresi secara polynomial jika ditabelkan dapat dilihat pada tabel 4.10 dan 4.11

Tabel 4.10 Perubahan Modulus Elastisitas secara Polynomial

Suhu (°C)	Modulus Elastisitas Sisa (%)
0	100
100	99,99
200	93,22
300	81,61
400	67,08
500	51,54
600	36,92
700	25,12
800	18,08
900	17,70

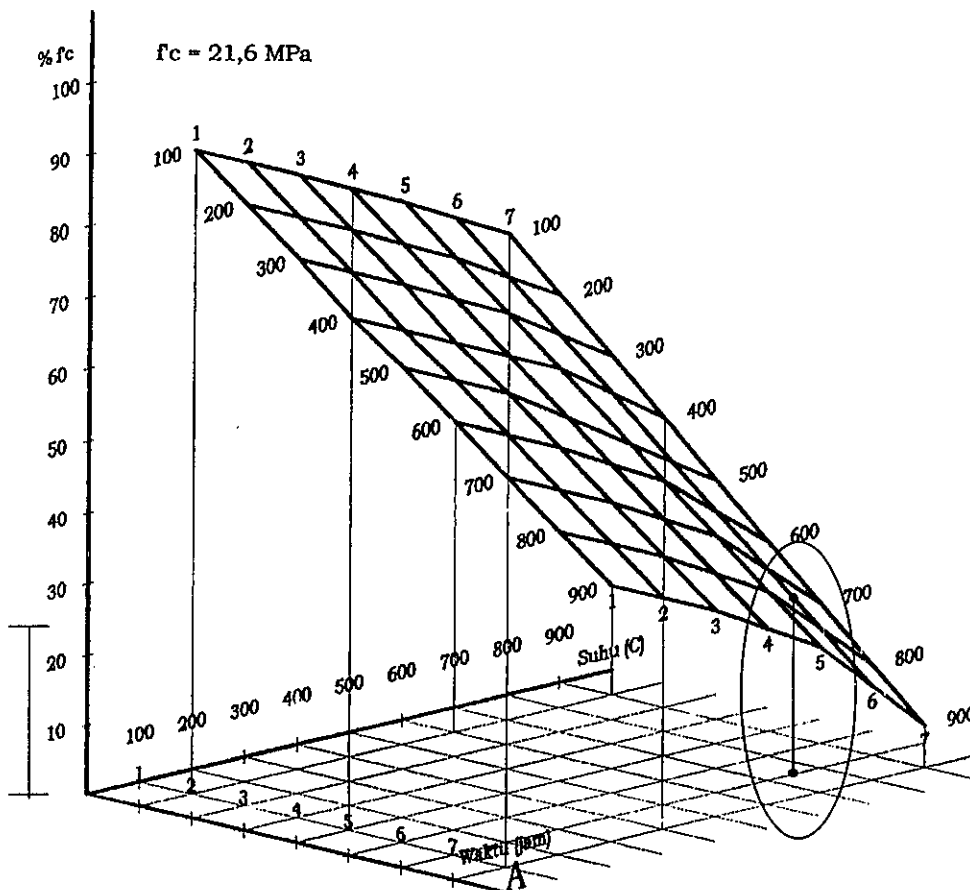
Tabel 4.11 Perubahan Kuat Tekan Beton secara Polynomial

Suhu (°C)	Kuat Tekan Sisa Beton (%)
0	100
100	89,20
200	76,92
300	63,97
400	51,17
500	39,34
600	29,27
700	21,79
800	17,70
900	17,81

4.6 Penggunaan Grafik

Grafik yang sudah ada di atas dapat digunakan secara biasa, berikut cara penggunaannya. Contoh gedung yang terbakar pada suhu 750°C , waktu 6 jam dengan kuat tekan beton 25 MPa. Cari nilai $\%f_c$.

1. Cari titik pertemuan antara suhu 750°C dan waktu 6 jam, pada kuat tekan beton 21,6 MPa dan kuat tekan beton 32,96 MPa
2. Ukur ketinggian dengan cara tarik garis vertikal dari titik yang diperoleh tadi sampai menyentuh bidang grafik.
3. Plot ketinggian yang diperoleh pada nomer 2 pada garis sumbu vertikal yang menunjukkan $\% f_c$, sehingga diperoleh nilai $\% f_c$ pada masing-masing kuat tekan. Pada kasus ini diperoleh nilai $\% f_c = 24,9625$ pada kuat tekan beton 21,6 MPa dan nilai $\% f_c = 20,4625$ pada kuat tekan beton 32,96 MPa



4. Dari 2 nilai tersebut kemudian diinterpolasi supaya diperoleh nilai kuat tekan beton 25 MPa, dengan rumus sebagai berikut :

$$x = \frac{B \times HK + D \times HB - D \times HK - K \times HB}{B - K}$$

$$x = \frac{32,96 \times 24,9625 + 25 \times 20,4625 - 25 \times 24,9625 - 21,6 \times 20,4625}{32,96 - 21,6}$$

$$x = 23,6156$$

dimana :

x = nilai hasil yang ditanyakan

D = nilai yang ditanyakan

B = nilai batas atas

HB = hasil batas atas

K = nilai batas bawah

HK = hasil batas bawah

Jadi nilai kuat tekan sisa beton yang terbakar pada suhu 750°C selama 6 jam dengan kuat tekan beton 25 MPa adalah 23,6156 %

4.7 Penggunaan Tabel

Tabel yang sudah ada di atas dapat juga digunakan untuk mencari perubahan kuat tekan, bahkan untuk mencari suhu yang lebih tinggi dari penelitian yang telah dilakukan, berikut cara penggunaannya. Contoh gudang yang terbakar pada suhu 700°C, waktu 8,5 jam dengan kuat tekan beton 30 MPa. Cari nilai %f_c.

1. Cari nilai suhu 700°C dan pada waktu 7 jam dan 9 jam, pada kuat tekan beton 21,6 MPa dan kuat tekan beton 32,96 MPa
2. Dari tabel 4.6 diperoleh nilai % f_c = 26,99 untuk waktu 7 jam dan %f_c = 6,76 untuk waktu 9 jam pada kuat tekan beton 21,6 MPa dan nilai % f_c = 24,26 untuk waktu 7 jam dan %f_c = 6,9 untuk waktu 9 jam pada kuat tekan beton 32,96 MPa
3. Dari nilai-nilai hasil tersebut kemudian diinterpolasi untuk mendapatkan waktu 8,5 jam

Untuk kuat tekan beton 21,6 MPa

$$x = \frac{B \times HK + D \times HB - D \times HK - K \times HB}{B - K}$$

$$x = \frac{9 \times 26,99 + 8,5 \times 6,76 - 8,5 \times 26,99 - 7 \times 6,76}{9 - 7}$$

$$x = 11,8175$$

Untuk kuat tekan 32,96 MPa

$$x = \frac{B \times HK + D \times HB - D \times HK - K \times HB}{B - K}$$

$$x = \frac{9 \times 24,26 + 8,5 \times 6,9 - 8,5 \times 24,26 - 7 \times 6,9}{9 - 7}$$

$$x = 11,24$$

4. Dari 2 nilai tersebut kemudian diinterpolasi supaya diperoleh nilai kuat tekan beton 30 MPa, dengan rumus sebagai berikut :

$$x = \frac{B \times HK + D \times HB - D \times HK - K \times HB}{B - K}$$

$$x = \frac{32,96 \times 11,8175 + 30 \times 11,24 - 30 \times 11,8175 - 21,6 \times 11,24}{32,96 - 21,6}$$

$$x = 11,39$$

Jadi nilai kuat tekan sisa beton yang terbakar pada suhu 700°C selama 8,5 jam dengan kuat tekan 30 MPa adalah 11,39 %.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian tingkat kerusakan dapat dibagi atas beberapa langkah pokok. Yakni pengukuran kualitatif dan kuantitatif, serta penentuan klasifikasi kerusakan akibat api. Sebagai indikasi awal, warna beton yang berubah akibat pemanasan, dapat dipakai sebagai petunjuk temperatur maksimum yang terjadi dan lama pengapian.

Namun, karena kesulitan mengetahui secara langsung berapa suhu yang dicapai berikut lama pemanasan, usaha lebih lanjut adalah pendekatan lewat pengamatan visual, pengujian setempat maupun uji coba beban.

Sesuai dengan penelitian ini yang bertujuan untuk mengetahui perubahan beton akibat temperatur tinggi, yaitu dengan mencari nilai kuat tekan dan modulus elastisitas beton mutu normal kuat tekan beton 21,6 MPa dan kuat tekan beton 32,96 MPa yang dibakar pada suhu 300°C, 600 °C, 900 °C selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam yang dibandingkan dengan tanpa dibakar. Dengan digunakannya dua kuat tekan beton juga ingin dicari perbedaannya. Berikut kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian ini :

1. Beton meskipun mempunyai ketahanan terhadap api yang lebih unggul dibandingkan material yang lain, namun tetap mengalami penurunan kekuatan dan modulus elastisitas setelah dibakar, yaitu dengan semakin tingginya suhu api yang dikenakan pada waktu 3 jam pada suhu 300°C pada beton maka kekuatannya pun juga semakin menurun yaitu menjadi berkisar 71,8%, juga pada suhu 600 °C, 900 °C yaitu menjadi berkisar 43,6% dan 15,4%, untuk beton dengan kuat tekan beton 21,6 MPa.
2. Perbedaan waktu pencapaian suhu pun juga menghasilkan penurunan kekuatan beton yang berbeda. Semakin lama waktu yang digunakan pada suhu yang sama juga mengakibatkan kekuatan dan modulus elastisitas beton semakin menurun. Pada suhu 600 °C kekuatan sisa beton menjadi berkisar 43,6%, 42,52%, 37,42% dan 20,08% untuk waktu 3 jam, 5 jam, 7 jam dan 9 jam, pada kuat tekan beton 21,6 MPa.
3. Digunakannya dua kuat tekan beton diharapkan dapat mengetahui perbedaannya, hasilnya pada kuat tekan beton 21,6 MPa dan kuat tekan beton 32,96 MPa mengalami perbedaan. Yaitu kuat tekan beton 32,96 MPa memiliki kecenderungan penurunan yang lebih banyak daripada kuat tekan beton 21,6 MPa meskipun dibakar pada suhu dan lama waktu yang

sama. Hal ini disebabkan karena faktor air semen, faktor air semen yang semakin kecil jika terkena temperatur tinggi nilai kehilangan kekuatannya semakin meningkat. Dapat dilihat pada gambar 4.18 sampai dengan 4.29

4. Warna beton setelah proses pendinginan membantu dalam menjelaskan temperatur maksimum yang pernah dialami beton pada beberapa kasus. Beton yang terbakar pada suhu 300°C secara fisik belum mengalami perbedaan yang terlalu jauh dari aslinya, hanya saja pada bagian permukaan sudah terselimuti kapur. Namun tidak terlalu banyak dan sudah terdapat retak rambut pada bagian permukaan. Hal ini dapat dilihat pada lampiran foto 5 sampai dengan foto 7.
5. Pada suhu 600°C , akibat adanya senyawa garam besi dalam agregat atau pasir beton membuat beton sedikit kemerahan, baik itu pada bagian permukaan maupun bagian dalam yang dapat dilihat pada lampiran foto 8 sampai dengan foto 10.
6. Pada suhu 900°C , beton mengalami *spalling* yaitu melepasnya sebagian permukaan beton dalam wujud lapisan tipis. Sedang *crazing* merupakan gejala retak remuk pada permukaan beton, seperti pecahnya kulit telur. Beton pada suhu 900°C ini sudah sangat parah, karena permukaan jika dipegang seperti ada serbuk kapur yang banyaksekali dan beton sudah bengkak-bengkak selebar 2 mm, sehingga sangat mengkhawatirkan saat proses pemindahannya. Beton pada suhu ini warnanya sudah keabu-abuan, dapat dilihat pada lampiran foto 11 sampai dengan foto 13.
7. Hasil grafik berupa tiga dimensi pada gambar 4.30 sampai dengan 4.33 dapat lebih memudahkan pencarian perubahan kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton paska beton terbakar. Yaitu dengan adanya data suhu dan lamanya kebakaran.
8. Adanya normalisasi untuk kuat tekan beton lebih memudahkan pencarian perubahan kuat tekan beton maupun modulus elastisitas beton tanpa harus interpolasi ataupun ekstrapolasi terlebih dahulu. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.34 dan 4.35.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil yang lebih mendalam mengenai pengaruh beton terhadap temperatur yang tinggi, maka diajukan beberapa saran berikut ini :

1. Pengujian yang dilakukan sebaiknya tidak hanya terhadap suhu 300°C , 600°C , 900°C tetapi kelipatan 100°C mulai dari 0°C sampai 1000°C misalnya, sehingga diperoleh hasil yang lebih menyeluruh.
2. Ada tempat khusus untuk pembakaran beton.

3. Serangkaian penelitian diharapkan bisa dilakukan pada satu tempat, sehingga tidak terlalu banyak resiko pada saat pemindahan beton.

DAFTAR PUSTAKA

1. Baker, MC (1996), "Thermal and Moisture Deformations in Building Materials", Jurnal
2. Departemen Pekerjaan Umum, "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung", SK SNI T-15-1991-03, 1992.
3. Fathony, M, (2001), "Perkiraan Kekuatan Bahan Bangunan, Setelah Kebakaran", Konstruksi September-Oktober
4. Gustafero, AH (1985) "Fire Resistance-Handbook of Concrete Engineering Second Edition", Van Nostrand Reinhold Company, New York.
5. Kardiyono (1996), "Teknologi Beton", NAFIRI, Yogyakarta.
6. London Distric Surveyors Association, "A Performance Based Approach to Fire Resistance of Structural Members", Jurnal.
7. Malhotra, HL (1982), "Design of Fire – Resisting Structures", Survey University Press, New York.
8. Neville, AM (1996), "Properties of Concrete", Longman.
9. Oroh, RR dan Suhendro, B (2004), "Perilaku Kolom Bulat Lilitan Spiral Pasca Bakar Akibat Beban Tekan Aksial Eksentris – Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan II".
10. Partowiyanto, A dan Sudarmadi (2003), "Pengembangan Teknik Estimasi Kekuatan Beton dengan Uji Ultrasonik", Jurnal.
11. Partowiyanto, A dan Sudarmadi, (2002), "Pengaruh Penyiraman Air pada Beton Pasca Pemanasan Suhu Tinggi", Jurnal PI-16-D9
12. Priyosulistyo (2004), "Perilaku Elemen Struktur Beton Bertulang Pasca Bakar – Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan II".
13. Purba, Alexander (2000), "Perbaikan Struktur Gedung Akibat Kebakaran", Konstruksi November-Desember
14. Ridwan Suhud dkk, "Pedoman Pelaksanaan Praktikum Beton", Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil ITB.
15. Sagel, Kole, Kusuma G, (1993), "Pedoman Pengerjaan Beton Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03", Erlangga, Jakarta.
16. Shorter, GW (1964), "Fire Endurance of Building Constraction", Jurnal.

17. Sidibe, Karamoko (2000), "Fire Safety of Reinforced Concrete Columns", ACI Structural Journal
18. Wahyudi, L, (1997), "Struktur Beton Bertulang Standar Baru SNI T15-1991-03", Gramedia, Jakarta.