

**PERBANDINGAN LEBAR RETAK BALOK AKIBAT
TEMPERATUR TINGGI DENGAN PERBEDAAN PROSES
PENDINGINAN NORMAL DAN DENGAN PENYIRAMAN**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

**IRAWAN AGUSTIAR
NIM. 0510613045-61**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2010**



LEMBAR PERSETUJUAN

PERBANDINGAN LEBAR RETAK BALOK AKIBAT TEMPERATUR TINGGI DENGAN PERBEDAAN PROSES PENDINGINAN NORMAL DAN DENGAN PENYIRAMAN

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

IRAWAN AGUSTIAR
NIM. 0510613045-61

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Ir. Edhi Wahyuni Setyowati, MT.

NIP. 1970616 18601 2 001

Dosen Pembimbing II

Retno Anggraini, ST., MT.

NIP. 19750129 200312 2 001

LEMBAR PENGESAHAN

PERBANDINGAN LEBAR RETAK BALOK AKIBAT TEMPERATUR TINGGI DENGAN PERBEDAAN PROSES PENDINGINAN NORMAL DAN DENGAN PENYIRAMAN

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

IRAWAN AGUSTIAR
NIM. 0510613045-61

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 4 Agustus 2010

Ir. Edhi Wahyuni Setyowati, MT.

NIP. 1970616 18601 2 001

Retno Angraini, ST., MT.

NIP. 19750129 200312 2 001

DOSEN PENGUJI

Ir. Siti Nurlina, MT

NIP. 19650423 199002 2 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Sipil

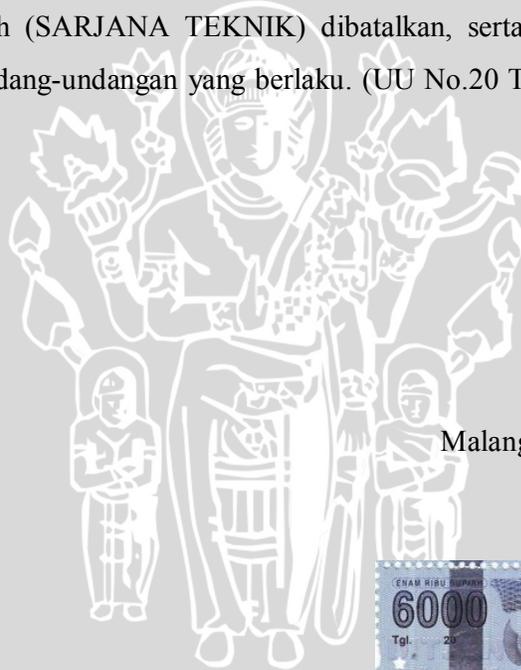
Ir. Sugeng P. Budio, MS

NIP. 19610125 198601 1 001

PERNYATAAN ORISINILITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah SKRIPSI ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah SKRIPSI ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia SKRIPSI ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (SARJANA TEKNIK) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku. (UU No.20 Tahun 2003 Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).



Malang, 4 Agustus 2010

Mahasiswa,



Nama : IRAWAN AGUSTIAR
NIM : 0510613045
JURUSAN : SIPIL



Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada :
Ayahanda dan Ibunda tercinta

PENGANTAR

Puji syukur saya kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan Hidayah-nya, penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “Perbandingan Lebar Retak Balok Akibat Temperatur Tinggi Dengan Perbedaan Proses Pendinginan Normal Dan Dengan Penyiraman”.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan akademik yang wajib ditempuh oleh setiap mahasiswa Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya guna menyelesaikan studinya serta guna memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Saya ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyusun skripsi ini, khususnya kepada :

1. Ir. Edhi Wahyuni S., MT., selaku Dosen Pembimbing Skripsi.
2. Retno Anggraini, ST, MT., selaku Dosen Pembimbing Skripsi.
3. Ir. Siti Nurlina, MT, selaku Dosen Penguji Skripsi
4. Yulvi Zaika, Dr. Eng., MT, selaku Dosen Wali.
5. Ir. Sugeng P. Budio, MS, selaku Ketua Jurusan Sipil.
6. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan ilmunya selama di bangku kuliah.
7. Bapak/Ibu dan seluruh keluarga serta semua pihak yang telah membantu saya demi terselesaikannya skripsi ini.
8. Bapak Sugeng dan Bapak Yunus, selaku pengelola Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi.
9. Semua teman-teman Sipil yang banyak membantu dalam terselesaikannya skripsi ini.
10. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan dan dorongan dalam menyusun skripsi ini.

Saya menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, saya berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Malang, 4 Agustus 2010

Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
DAFTAR SIMBOL	x
RINGKASAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Pembatasan Masalah	2
1.5 Tujuan Penelitian	3
1.6 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Beton	4
2.1.1 Pengertian Beton	4
2.2 Proses Perpindahan Panas	5
2.2.1 Daya Hantar Panas Beton	5
2.2.2 Perpindahan panas Konduksi	6
2.3 Pengaruh Temperatur Pada Beton	7
2.3.1 Ketahanan dan Kekuatan Beton Akibat Temperatur Tinggi.....	8
2.3.2 Perubahan Sifat Thermal dan Perubahan Warna Akibat Temperatur Tinggi.....	9
2.3.3 Kerusakan Pada Beton Akibat Temperatur Tinggi	11
2.4 Retak Susut dan Retak Akibat Perubahan Suhu	12
2.5 Rangkak (Creep)	14
2.6 Perilaku Keruntuhan Balok	15
2.6.1 Taraf Praretak (Daerah I)	15
2.6.2 Taraf Beban Pasca Retak (Daerah II)	16
2.6.3 Taraf Retak Pasca-Serviceability dan Keadaan Limit (Daerah III)	16
2.7 Perilaku Retak Beton	17
2.8 Tipe-Tipe Retak	18
2.9 Retak Lentur	20
2.9.1 Mekanisme Retak Lentur	21
2.10 Evaluasi Lebar Retak	22
2.11 Lebar Retak Ijin.....	23
2.12 Hipotesis Penelitian	24

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat Pembuatan Benda Uji dan Penelitian	25
3.2 Bahan dan Peralatan Yang Digunakan	25
3.3 Tungku Pembakaran	27
3.4 Prosedur Pembuatan Benda Uji	28
3.5 Diagram Alir Penelitian	29
3.6 Rancangan Penelitian	30
3.7 Perawatan Pembakaran Serta Perlakuan Pendinginan Benda uji	31
3.7.1 Perlakuan Pendinginan Benda Uji dengan Cara Penyiraman.....	31
3.7.2 Perlakuan Pendinginan Benda Uji Dengan Cara Normal (tanpa Penyiraman)	31
3.8 Prosedur Penelitian	31
3.9 Variabel Penelitian	33
3.10 Metode Pengambilan Data	33
3.11 Analisis Statistik.....	33
3.11.1 Normalitas	33
3.11.2 Homogenitas	34
3.11.3 Analisis Regresi.....	34

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

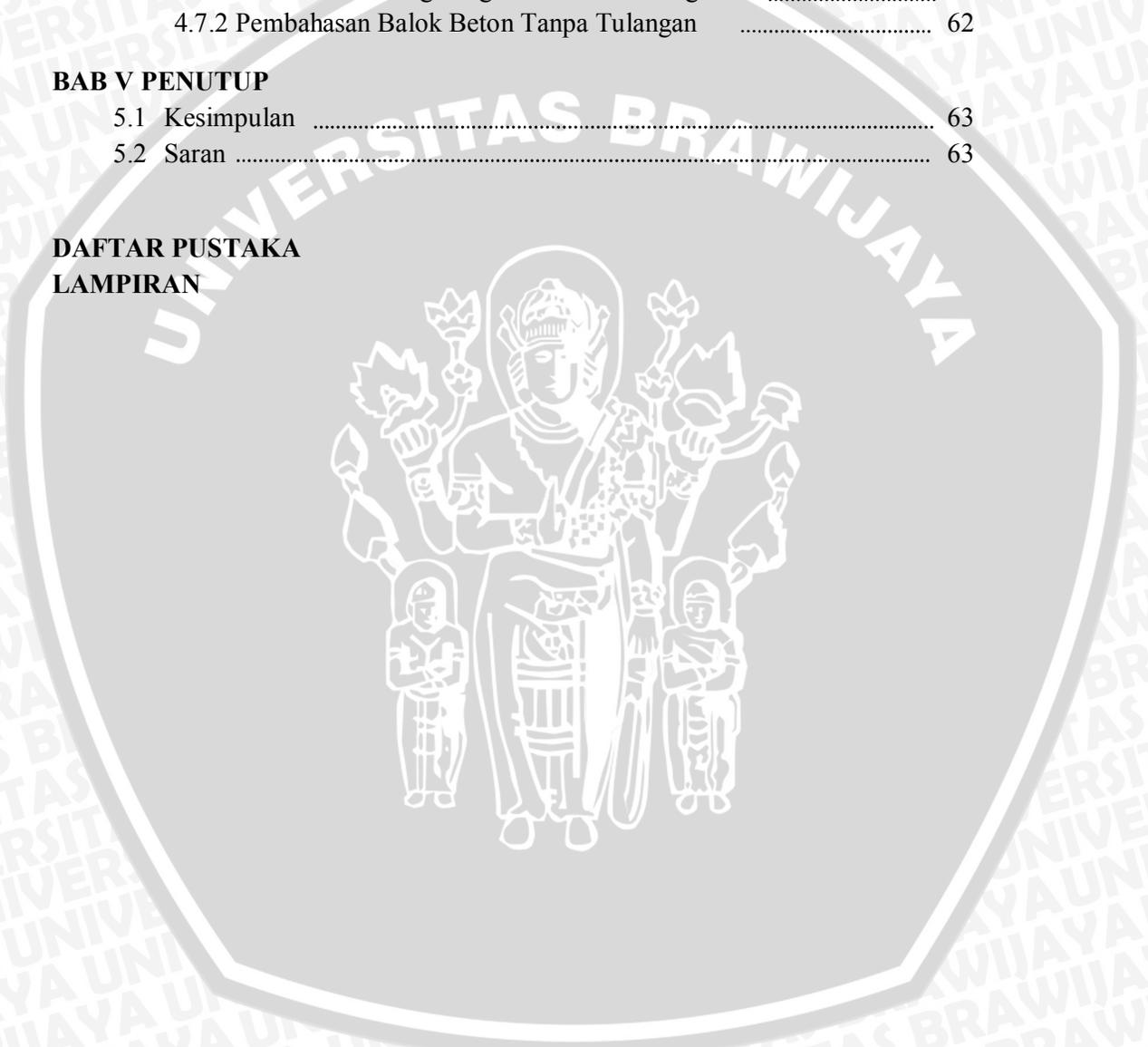
4.1 Perhitungan Kalor dan Lama Kalor Merambat	36
4.1.1 Perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat kondisi di lapangan.....	36
4.1.2 Perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat secara teoritis.....	36
4.1.3 Perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat menurut standar ASTM.....	39
4.2 Pengujian Kuat Tekan Beton	40
4.3 Perubahan Fisik Beton	41
4.3.1 Perubahan Warna	41
4.3.2 Perubahan Kerusakan Beton	42
4.4 Penurunan Berat Akibat Temperatur	42
4.5 Pengujian Lebar Retak Balok Beton	45
4.5.1 Pengujian Lebar Retak Balok Beton Bertulang	45
4.5.1.1 Pengamatan Lebar Retak Tiap 1 Setrip	45
4.5.1.2 Pengamatan Lebar Retak Tiap 5 Setrip	48
4.5.2 Pengujian Lebar Retak Balok Beton Tanpa tulangan	52
4.5.3 Pengolahan Data Lebar Retak	52
4.6 Pengujian Hipotesis	55
4.6.1 Uji Kenormalan Data	55
4.6.2 Uji Homogenitas	56
4.6.3 Analisis Varian	57

4.7 Pembahasan	59
4.7.1 Pembahasan Balok Beton Bertulang	59
4.7.1.1 Retak yang Terjadi pada Balok Beton bertulang	59
4.5.1.2 Pembahasan Mengenai Lebar Retak Pada Balok Beton bertulang	60
4.5.1.3 Pembahasan Lebar Retak pada Balok Beton Bertulang dengan Variasi Suhu	61
4.5.1.4 Pembahasan Lebar Retak pada Balok Beton Bertulang dengan Variasi Pendinginan	62
4.7.2 Pembahasan Balok Beton Tanpa Tulangan	62

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63

**DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN**



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perubahan Sifat Thermal Beton Akibat Temperatur Tinggi.....	9
Tabel 2.2	Perubahan Warna, Kondisi dan Kerusakan Beton Akibat Temperatur Tinggi.....	10
Tabel 2.3	Perubahan Warna dan Kondisi Beton Sesuai Perubahan Suhu.....	10
Tabel 2.4	Toleransi Lebar Retak Beton.....	23
Tabel 3.1	Rancangan pembuatan benda uji.....	28
Tabel 4.1	Waktu yang Dibutuhkan Saat Pembakaran Benda Uji Beton.....	36
Tabel 4.2	Hasil Kuat Tekan Hari ke-7.....	40
Tabel 4.3	Hasil Kuat Tekan Hari ke-14.....	40
Tabel 4.4	Hasil Kuat Tekan Hari ke-21.....	40
Tabel 4.5	Hasil Kuat Tekan Hari ke-28.....	41
Tabel 4.6	Perubahan Warna.....	41
Tabel 4.7	Kerusakan pada Beton.....	42
Tabel 4.8	Penurunan Berat Beton Bertulang Akibat Temperatur Tinggi	43
Tabel 4.9	Penurunan Berat Beton Tanpa Tulangan Akibat Temperatur Tinggi.....	44
Tabel 4.10	Data Beban,Lendutan dan Nomor Retak Beton Uji no.42	46
Tabel 4.11	Data Lebar Retak 1 Setrip Pada Beton Uji no.42.....	47
Tabel 4.12	Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 3588,75 kg.....	48
Tabel 4.13	Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4248,75 kg.....	49
Tabel 4.14	Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4908,75 kg.....	49
Tabel 4.15	Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 3588,75 kg.....	50
Tabel 4.16	Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4248,75 kg.....	51
Tabel 4.17	Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4908,75 kg.....	51
Tabel 4.18	Lebar Retak Terbesar pada Tiap Balok Uji dengan Pembakaran.....	52

Tabel 4.19 Lebar Retak Maksimum pada Balok Beton Kondisi 1 Strip Sebelum Runtuh.....	55
Tabel 4.20 Hasil Uji Kenormalan <i>Kolmogorov-smirnov Test</i>	56
Tabel 4.21 Hasil Uji Homogenitas data.....	56
Tabel 4.22 Hasil Analisis Varian Terhadap Lebar Retak.....	58



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Gambar Distribusi Suhu Pada Balok	7
Gambar 2.2. Regangan Susut.....	13
Gambar 2.3. Gaya Susut di Dekat Gaya Sebuah Retakan.....	13
Gambar 2.4. Grafik hubungan beban (p) dengan lendutan (δ) balok beton bertulang yang didapat dari hasil pengamatan.....	15
Gambar 2.5. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok Taraf Praretak.....	16
Gambar 2.6. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok Taraf Pasca Retak.....	16
Gambar 2.7. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Taraf Balok Serviceability.....	17
Gambar 2.8. Retak Beton Akibat Gaya Tarik.....	18
Gambar 2.9. Retak Beton Akibat Momen.....	18
Gambar 2.10. Retak Beton Akibat Geser.....	19
Gambar 2.11. Retak Beton Akibat Torsi.....	19
Gambar 2.12. Retak Beton Akibat Tegangan Lekat.....	20
Gambar 2.13. Retak Beton Akibat Tegangan Lekat.....	20
Gambar 2.14. Lentur dari Suatu Panjang Balok.....	20
Gambar 3.1. Diagram Pengerjaan Penelitian.....	29
Gambar 3.2. Statika Pembebanan.....	30
Gambar 3.3. Diagram Pengerjaan Penelitian.....	32
Gambar 4.1. Perbandingan perubahan suhu standart, penelitian dan teoritis	39
Gambar 4.2. Perbandingan Penurunan Berat Beton Bertulang Akibat Temperatur Tinggi	43
Gambar 4.3. Perbandingan Penurunan Berat Beton Tanpa Tulangan Akibat Temperatur Tinggi	44
Gambar 4.4. Gambar Retak Pada Sisi Depan dan belakang balok no.42.....	46
Gambar 4.5. Gambar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 3588,75 kg	48
Gambar 4.6. Gambar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4248,75 kg	49
Gambar 4.7. Gambar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4908,75 kg.....	49
Gambar 4.8. Gambar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 3588,75 kg	50
Gambar 4.9. Gambar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4248,75 kg.....	50

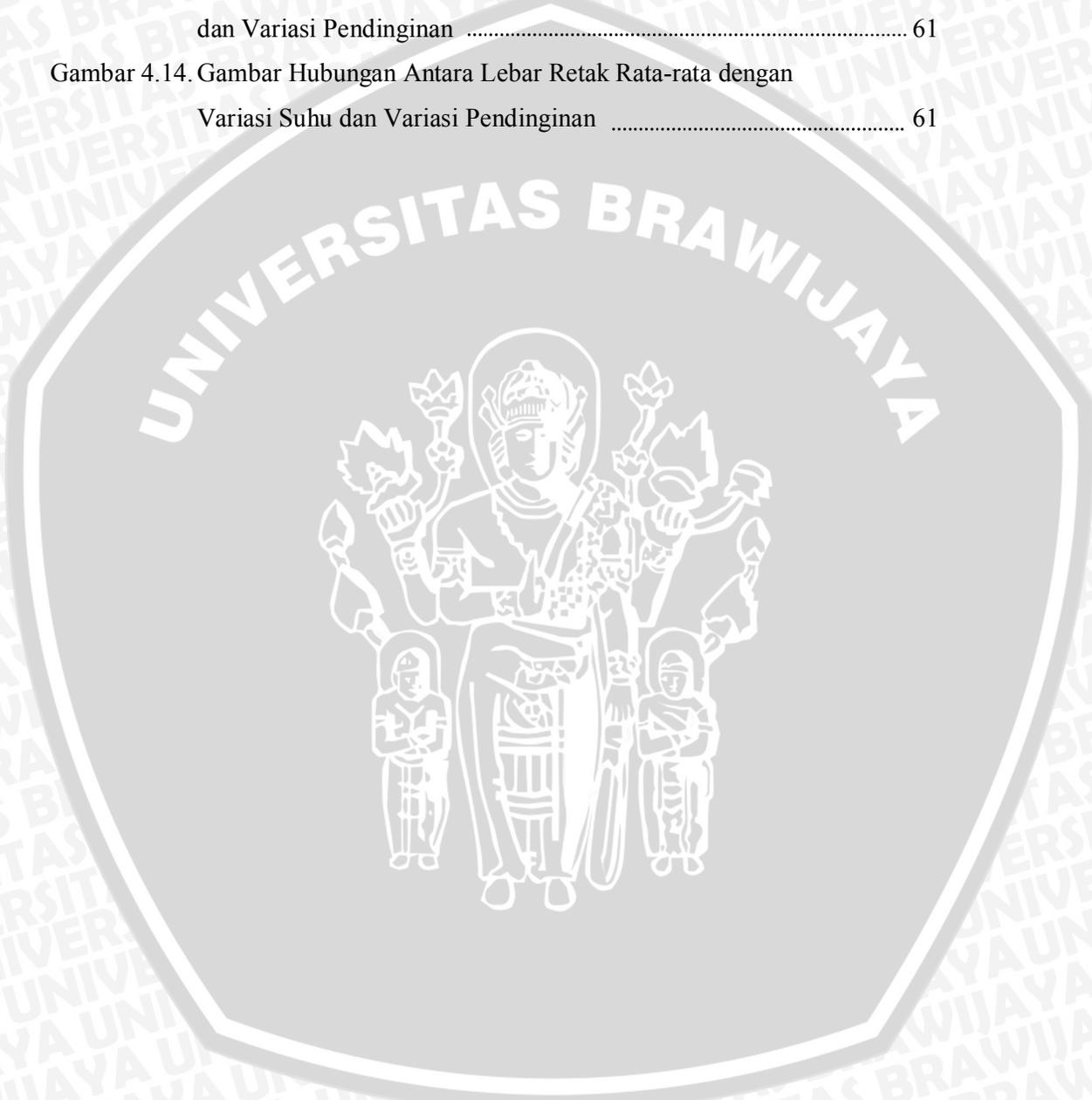
Gambar 4.10. Gambar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan
4908,75 kg 51

Gambar 4.11. Gambar Retak Pada Beton Tanpa Tulangan 52

Gambar 4.12. Diagram Momen Lintang Pada Balok Beton Bertulang 60

Gambar 4.13. Gambar Hubungan Antara Lebar Retak dengan Variasi Suhu
dan Variasi Pendinginan 61

Gambar 4.14. Gambar Hubungan Antara Lebar Retak Rata-rata dengan
Variasi Suhu dan Variasi Pendinginan 61



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Beban, Lendutan dan Retak Balok Bertulang Tiap 1 Setrip.....	64
Lampiran 2	Gambar Retak Balok Bertulang Tiap 1 Setrip	72
Lampiran 3	Data Pengamatan Lebar Retak Balok Bertulang Tiap 1 Setrip.....	80
Lampiran 4	Data Beban, Lebar Retak dan Gambar Retak Balok Bertulang Tiap 5 Setrip	82
Lampiran 5	Gambar Retak Pada Beton Tanpa Tulangan.....	149
Lampiran 6	Hasil Analisis Statistik.....	157
Lampiran 7	Grafik Perbandingan Suhu Pembakaran Benda Uji (Penelitian Teoritis dan ASTM).....	167
Lampiran 8	Pemeriksaan dan Analisis Bahan Campuran Beton Serta Perhitungan Mix Desain.....	172
Lampiran 9	Foto Beton Sebelum dan Sesudah Mengalami Proses Pembakaran.....	189
Lampiran 10	Foto Alat Pembakaran Benda Uji.....	191
Lampiran 11	Foto Pengujian Lebar Retak Beton.....	193

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran	Satuan	Simbol
Berat balok tiap satuan panjang	kg/cm	W balok
Beban	kg	P
Momen nominal	kgcm; kgmm	Mn
Kuat tekan beton	kg/cm ²	f ^t c
Tegangan leleh baja tulangan	kg/cm ²	f _y
Luas tulangan	cm ²	A _s
Lebar penampang balok	cm	b
Jarak serat atas penampang ke titik Pusat gaya tekan	cm	a
Jarak serat atas penampang ke garis netral	cm	c
Jarak serat atas penampang ke titik berat tulangan	cm	d
Jarak serat bawah penampang ke titik berat tulangan	cm	dc
Tinggi penampang balok	cm	h
Tegangan baja tulangan	kg/cm ² ; ksi	f _s
Jarak garis netral ke serat bawah penampang	cm	h ₂
Jarak garis netral ke titik berat tulangan	cm	h ₁
h ₂ /h ₁	-	β
Luas penampang tarik dibagi jumlah tulangan	cm ² ; in ²	A
Lebar retak pada balok	in ; mm	W



RINGKASAN

Irawan Agustiari, Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2010, *Perbandingan Lebar Retak Balok Akibat Temperatur Tinggi Dengan Perbedaan Proses Pendinginan Normal Dan Dengan Penyiraman*, Dosen Pembimbing : Ir. Edhi Wahyuni Setyowati, MT dan Retno Anggraini, ST., MT.

Musibah kebakaran pada struktur bangunan gedung di beberapa kota besar masih sering terjadi. Akibat yang ditimbulkan oleh kebakaran merupakan salah satu bentuk kegagalan struktur yang memiliki resiko tinggi. Kebakaran dapat dianggap suatu bentuk pembebanan termal yang tidak diinginkan atau diharapkan pada bangunan gedung, suhunya cenderung tinggi dan berlangsung relative singkat. Adanya pengaruh siklus pemanasan dan cara pendinginan menyebabkan struktur beton akan terjadi retak-retak yang makin lama makin lebar, sampai pada suatu ketika struktur beton tersebut akan runtuh (*collapse*). Dari beberapa penjelasan di atas, maka pada penelitian ini akan dibahas tentang kekuatan struktur beton khususnya perbandingan lebar retak balok beton dengan tulangan dan beton tanpa tulangan akibat suhu tinggi pembakaran dengan perbedaan proses pendinginan normal dan penyiraman. Perbedaan proses pendinginan tersebut yaitu kondisi pendinginan normal (pendinginan tanpa penyiraman) dan kondisi pendinginan yang disertai dengan penyiraman.

Penelitian ini dilakukan dengan memberikan temperatur kepada benda uji yaitu 200°C, 400°C dan 600°C dengan faktor air semen tetap pada umur 28 hari dan akan dilakukan penyiraman setelah beton dibakar pada suhu yang telah ditetapkan. Proses pembakaran dilakukan dengan menggunakan burner dengan kapasitas suhu 1000°C dengan dimensi 1 m x 1 m x 1 m. Setelah benda uji mengalami proses pembakaran, langkah selanjutnya benda uji akan diberi perlakuan *treatment* pendinginan. *Treatment* pendinginan yang dilakukan yaitu pendinginan normal (tanpa disiram) dan pendinginan disiram. Pengujian dilakukan pada balok ukuran 75cm x 15 cm x 15 cm dan pengamatan lebar retak menggunakan alat *Crack Detector Microscope* yang dilakukan pada balok uji setiap penambahan beban LCD sebesar 1 setrip dan 5 setrip.

Data yang diambil dari hasil pengujian adalah data lebar retak balok 1 setrip sebelum runtuh. Dari data pengamatan akan ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan variasi suhu pembakaran dan variasi *treatment* pendinginan pada lebar retak balok 1 setrip sebelum runtuh. Dari grafik yang ditampilkan akan dapat dilihat beberapa perbedaan lebar retak pada tiap-tiap variasi. Untuk mengetahui adanya perbedaan lebar retak, maka digunakan analisa varian dua arah.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa lebar retak balok setiap peningkatan temperatur tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, dikarenakan kurangnya jumlah variasi suhu yang diberikan. Dari perlakuan *treatment* pendinginan tidak ada perbedaan yang signifikan antara pendinginan normal (tanpa disiram) dan pendinginan disiram.

Kata kunci : lebar retak, suhu, pendinginan, balok, pasca kebakaran

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Musibah kebakaran pada struktur bangunan gedung di beberapa kota besar masih sering terjadi. Akibat yang ditimbulkan oleh kebakaran merupakan salah satu bentuk kegagalan struktur yang memiliki resiko tinggi. Kebakaran dapat dianggap suatu bentuk pembebanan termal yang tidak diinginkan atau diharapkan pada bangunan gedung, suhunya cenderung tinggi dan berlangsung relative singkat.

Perubahan yang umum timbul akibat kebakaran pada suatu gedung ialah permukaan struktur berwarna hitam dan terjadi retak yang di akibatkan tingginya temperatur suhu api, hal tersebut akan mempengaruhi kualitas/kekuatan struktur beton tersebut. Sehingga menyebabkan kekuatan beton menurun, dan penggunaan struktur bangunan tersebut juga akan berkurang (tidak maksimal). Akan tetapi kekuatan struktur bangunan beton pasca kebakaran juga ditentukan oleh durasi waktu yang diterima bangunan terhadap api pada saat terbakar.

Berbagai teknik untuk mengontrol atau mengurangi pengaruh kebakaran telah dikembangkan akhir-akhir ini. Perkembangan tentang fenomena dan dinamika kebakaran telah dijadikan tuntutan perencana dalam melindungi bangunan dan memprediksi kemampuan bangunan tahan api. Adanya pengaruh siklus pemanasan dan cara pendinginan menyebabkan struktur beton akan terjadi retak-retak yang makin lama makin lebar, sampai pada suatu ketika struktur beton tersebut akan runtuh (*collapse*).

Dari beberapa penjelasan di atas, maka pada laporan skripsi ini akan dibahas tentang kekuatan struktur beton khususnya perbandingan lebar retak balok beton dengan tulangan dan beton tanpa tulangan akibat suhu tinggi pembakaran dengan perbedaan proses pendinginan normal dan penyiraman. Perbedaan proses pendinginan tersebut yaitu kondisi pendinginan normal (pendinginan tanpa penyiraman) dan kondisi pendinginan yang disertai dengan penyiraman pada saat umur beton 28 hari.

Sebagai penelitian akan diambil variasi kenaikan temperatur dan perbedaan proses penyiraman untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap lebar retak, sehingga dapat diketahui apakah suatu struktur beton masih layak dipakai atau tidak pada pasca kebakaran.

1.2 Identifikasi masalah

Identifikasi permasalahan yang timbul disini adalah belum tersedianya data-data pasti di Indonesia (standarisasi) mengenai perubahan kualitas beton seiring kenaikan temperatur baik ditinjau dari segi kekuatan maupun kerusakan yang mengalami proses pendinginan, yang dapat digunakan sebagai acuan untuk proteksi pada struktur beton pasca kebakaran (*Structural Fire Protection*).

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan di atas, maka ada beberapa rumusan masalah yang menjadi pokok pembahasan dari materi ini, antara lain :

1. Berapa lebar retak beton tanpa tulangan akibat suhu tinggi saat umur beton setelah 28 hari yang didinginkan pada kondisi pendinginan tanpa penyiraman dan dengan penyiraman?
2. Berapa lebar retak beton bertulang akibat suhu tinggi saat umur beton setelah 28 hari yang didinginkan pada kondisi pendinginan tanpa penyiraman dan dengan penyiraman?
3. Bagaimana perbandingan dari lebar retak beton dan keadaan beton yang didinginkan tanpa penyiraman dengan lebar retak beton dan keadaan beton yang didinginkan melalui cara penyiraman?
4. Bagaimana perubahan warna dan kerusakan beton akibat suhu tinggi pada saat umur beton setelah 28 hari yang didinginkan pada kondisi pendinginan dengan penyiraman?

1.4 Pembatasan Masalah

Agar dalam penelitian ini dapat terfokus pada tujuan penelitian, maka akan dibatasi beberapa permasalahan antara lain :

1. Benda uji balok yang digunakan adalah balok persegi.
2. Mutu beton yang diuji sebagai standar minimal beton struktural adalah 25 Mpa.
3. Benda uji berupa balok dengan ukuran 150 mm x 150 mm x 750 mm, yang terdiri dari balok beton tanpa tulangan dan balok beton bertulang dengan tulangan 3-Ø8.
4. Pengujian dilakukan dengan dua beban terpusat yang simetris.

5. Nilai faktor air semen (nilai w/c) ditentukan berdasarkan mutu beton yang diinginkan
6. Agregat yang digunakan berasal dari daerah Malang dan Semen yang digunakan adalah Semen Gresik, OPC
7. Tegangan rata – rata benda uji menurut hasil pengujian, setelah umur beton mencapai 28 hari dan telah dilakukan perawatan.
8. Beton diuji berdasarkan lebar retak beton pada temperatur 200°C, 400°C, 600°C, setelah beton didinginkan untuk jangka waktu yang telah ditentukan (saat suhu beton sudah kembali normal) baru dilakukan uji lebar retak sampai kondisi beton hancur serta pengamatan luar terhadap keadaan beton.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa jauh perbandingan lebar retak beton akibat temperatur atau suhu yang tinggi pada kondisi pendinginan tanpa penyiraman dan dibandingkan dengan kondisi pendinginan yang disertai dengan adanya penyiraman pada waktu yang sudah ditentukan. Temperatur yang diujikan pada suhu 200°C, 400°C, 600°C, dan saat pengujian beton berumur setelah 28 hari.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat dari skripsi ini yaitu dapat digunakan sebagai referensi bagi tenaga ahli bidang struktur beton dalam usahanya memperbaiki dan merahabilitasi struktur yang rusak akibat dilanda kebakaran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton

2.1.1. Pengertian beton

Beton adalah suatu bahan komposit yang terdiri dari campuran semen, air dan agregat. Pasta semen yang masih segar sebagai campuran antara semen dan air berfungsi untuk meyelimuti seluruh permukaan agregat, yang selanjutnya dalam proses pengerasan pasta semen akan menjadi batu semen akan mengikat agregat membentuk suatu kesatuan yang solid.

Beton merupakan material pembentuk struktur bangunan yang mempunyai kemampuan tahan terhadap temperatur tinggi karena beton merupakan material dengan daya hantar panas yang rendah, sehingga dapat menghalangi rembetan panas ke bagian dalam struktur beton tersebut. Di dalam pengaplikasiannya di lapangan, kolom, balok, dan plat merupakan unsur terpenting suatu bangunan yang terbuat dari beton serta direncanakan menurut dimensi dan dibuat dengan bentuk yang berbeda-beda sehingga kuat untuk menopang beban yang menimpa struktur tersebut.

Menurut pengertiannya beton merupakan fungsi dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolis (portland cement), agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambah (admixture atau additive) (Tri Mulyono, 2004:3). Bahan tambahan ini diperlukan dengan tujuan tertentu, sehingga bahan tambahan bukan merupakan unsur utama penyusun beton. Atau secara jelasnya, beton didapat dari pencampuran bahan-bahan agregat halus dan agregat kasar yaitu pasir, batu, batu pecah, atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan secukupnya bahan perekat semen , dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan pengawetan beton berlangsung (Dipohusodo, 1999:1).

Hal penting diketahui dari hasil percobaan kuat tekan beton pada suhu pemanasan 200 °C bukan terjadi penurunan kekuatan tekan,namun justru terjadi penguatan akibat dari fenomena perawatan yang dipercepat (*accelerated curing*). (Dr.ir.Amir Partowiyatmo, 2003:139)

Hansen (1976) menyebutkan terdapat sedikit peningkatan kuat tekan beton bila dipanaskan pada temperatur 200-300°C, tetapi akan lebih dari 80% dari kuat tekan awal bila dipanaskan pada temperatur 400 °C, dan 30% pada temperatur 700 °C.

Penelitian yang dilakukan Dr.Ir. Amir Partowiyatmo melahirkan sebuah alternatif cara memperbaiki beton yang rusak karena terbakar, yaitu dengan menyiram dengan air. Treatment penyiraman air pada proses recovery kekuatan beton terbakar bertujuan agar air dapat meresap ke dalam beton dan bereaksi dengan senyawa C2S dan C3S pada butiran – butiran semen yang belum bereaksi maupun senyawa β C2S pada semen akibat beton yang terbakar. Hasil dari reaksi ini adalah CSH dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. penyiraman dilakukan hingga kondisi beton jenuh. ”terdapat beberapa metode penyiraman, pertama menggunakan kain goni yang direndam air, kemudian dibalutkan pada beton kolom, kedua menggunakan selang berlubang-lubang yang dialiri air kemudian dililitkan pada kolom dan ketiga menggunakan sprinkle, ”tentu saja aliran air di kontrol dengan timer sebagai upaya efisiensi. Menurutnya, tingkat recovery kekuatan beton setelah dilakukan treatment penyiraman dengan air mampu mendekati 100% dari kekuatan awal beton sebelum terbakar. Terdapat dua faktor utama yang sangat berpengaruh terhadap proses recovery kekuatan beton terbakar. Pertama, mutu beton dengan melihat pendinginan air dan semennya (water cement ratio), semakin besar W/C berarti jumlah semen yang belum selesai bereaksi semakin banyak, tingkat recovery betonnya pun semakin tinggi dan cepat. Kedua, lamanya beton terbakar. Semakin lama beton terbakar berarti panas yang diterima beton pun semakin tinggi, akibatnya proses treatment yang harus dilakukan semakin lama dan tingkat recovery beton justru tidak terlalu tinggi.

2.2. Proses perpindahan panas

2.2.1. Daya hantar panas beton

Perpindahan panas yang terjadi pada suatu zat disebabkan oleh adanya perbedaan suhu. Perpindahannya terjadi dari bagian suhu yang tinggi ke bagian suhu yang rendah melalui penghantar zat tersebut. Zat itu dapat berupa cair, padat, gas dan udara. Daya hantar panas pun berbeda-beda. Zat padat khususnya beton, sifat daya hantar panasnya tergantung dari sedikit banyaknya jumlah rongga yang terdapat dalam campuran beton itu sendiri. Banyaknya jumlah rongga dalam campuran beton ini dapat juga dilihat dari berat jenis betonnya. Semakin besar nilai berat jenis beton, kepadatan beton tinggi, sehingga jumlah rongga yang ada sedikit. Banyaknya rongga yang ada ini pun menyebabkan besar kecilnya volume rongga pada beton tersebut.

Besar kecilnya volume rongga yang terdapat dalam beton tergantung pada:

- a. jenis material penyusun
- b. keausan material penyusun
- c. faktor air semen
- d. workability
- e. gradasi ukuran agregat material penyusun

2.2.2. Perpindahan panas konduksi

Perpindahan panas konduksi terjadi dengan mentransfer panas melalui material tanpa disertai gerak kuat material. Atom-atom atau molekul-molekul dalam bagian temperatur lebih tinggi bergerak dengan bervibrasi dari suhu tinggi ke suhu rendah. Molekul-molekul yang berenergi lebih tinggi memberikan sebagian energinya kepada molekul tetangga yang energinya lebih rendah. Hal ini berlangsung terus hingga molekul di semua bagian bervibrasi dengan energi yang sama. Perpindahan panas dengan kondisi tersebut terjadi hanya jika ada perbedaan temperatur diantara dua bagian media.

Sebatang logam dengan tebal Δx , luas penampang A , kedua sisinya pada temperatur yang berbeda $T_2 > T_1$, besarnya transfer panas q_x yang terjadi :

$$q_x = A \frac{\Delta T}{\Delta x}; \Delta T = T_2 - T_1$$

untuk tiap-tiap material memiliki q_x yang berbeda. Karena adanya perbedaan inilah, maka diperlukan suatu percobaan untuk mengetahui penyebab perbedaan ini, dan pada akhirnya dibuat angka koefisien k dengan satuan ($W/m^\circ C$). Konstanta k disebut konduktivitas atau kehantaran termal (thermal conductivity). Akibat adanya k , persamaan menjadi :

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

jika persamaan dibagi dengan luas penampang A maka diperoleh q_x :

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

q_x disebut flux panas dengan satuan ($K \text{ cal}/m^2$), yaitu laju perpindahan panas dalam arah x persatuan luas (m^2) yang tegak lurus pada arah perpindahan dan sebanding dengan gradien temperatur, dT/dx pada arah yang sama. Tanda negatif hanya menunjukkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika bahwa perpindahan panas terjadi dari temperatur tinggi ke rendah.

Karena,

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Maka persamaan dapat diubah menjadi :

$$q_x'' = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

Dimana :

q = Laju perpindahan kalor (Watt)

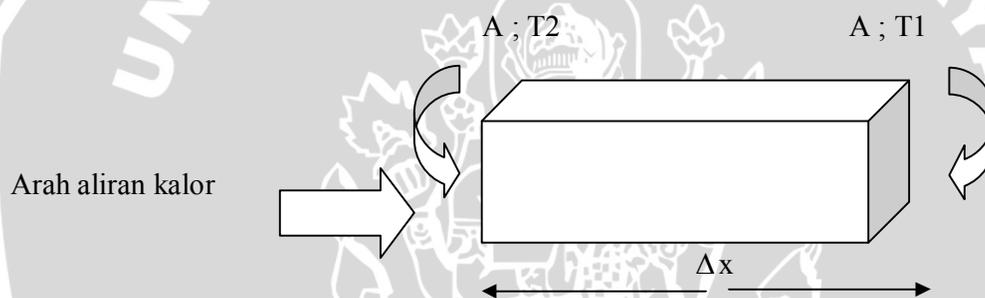
k = Thermal conductivity (Watt / meter. °C)

A = Luas permukaan elemen (meter²)

T₂ = Suhu muka dinding 2 / suhu terendah (°C)

T₁ = Suhu muka dinding 1 / suhu tertinggi (°C)

Δx = Tebal elemen (meter)



Gambar 2.1. Gambar Distribusi Suhu Pada Balok

2.3. Pengaruh Temperatur Pada Beton

Neville (1975), mengemukakan bahwa ada tiga sifat yang mempengaruhi beton bila dipanasi yaitu : koefisien muai panas, panas jenis dan daya hantar panas. Hasil penelitian juga menunjukkan adanya penurunan kuat tekan beton jika terjadi kenaikan temperatur pada beton dengan agregat batu kapur dan batu silika. Diduga untuk temperatur di atas 400°C kuat tekan beton hanya turun hingga tinggal 90% dari kuat tekan pada suhu ruang dan maksimum tinggal 40% apabila pembakaran mencapai temperatur diatas 600°C. Juga menurut Neville (1975) adanya tiga sifat yang mempengaruhi perilaku beton dalam jangka panjang dengan berbagai kondisi yaitu daya hantar panas yang merupakan rasio dari perubahan panas terhadap temperatur. Tingkat konduktivitas air kurang dari setengah tingkat konduktivitas pasta semen, sehingga semakin berkurang kandungan air dalam beton semakin tinggi tingkat konduktivitas

beton dan kuat tekan beton bertambah. Penyebaran panas (thermal diffusivity) yang merupakan luasan perubahan temperatur yang dapat terjadi pada suatu benda untuk menentuka hubungan antara waktu perbedaan temperatur antara bagian dalam dan permukaan benda uji. Kalor panas (specific heat) yang dinyatakan sebagai kapasitas panas beton bertambah sejalan dengan bertambahnya kandungan air pada beton.

Addleson (1976), menyatakan bahwa pada temperatur yang tidak melebihi 250°C, kerusakan yang ditimbulkan pada struktur beton umumnya hampir tidak berarti.

Riley, 1991 (dalam Gani 1997), menyatakan bahwa pada temperatur 300-500°C retak yang terjadi adalah didalam pasta semen (mortar) dan sekitar partikel agregat, sedangkan di bawah temperatur 300°C *crack* terbatas disekitar partikel agregat.

ITB (1998), laporan akhir pengujian bahan bangunan pasca bakar : kerusakan elemen struktur beton akibat kebakaran akan berakibat fatal apabila terjadi pengelupasan selimut beton (*spalling*). Beton yang mengalami peningkatan temperatur selama pemanasan, air yang tekndung dalam pori-pori dan kapiler beton akan menguat. Pada 100°C sebagian air dan kalsium silikat (CaSi) sebagai desikasi yang terhidrasi dalam pasta semen akan menghilang, diikuti dengan berkurangnya kekuatan. Peningkatan jumlah tekanan uap pada pori-pori beton tersebut akibat terjadinya *explosive spalling*, yaitu sebagian segmen beton terlepas dari permukaan, ini terjadi pada temperatur 300-600°C. Pelepasan secara gradual selanjutnya akan terjadi karena adanya formasi retakan pada beton pada suhu 600°C-900°C beton menjadi sangat lemah dan rapuh (brittle).

2.3.1. Ketahanan dan Kekuatan Beton Akibat Temperatur Tinggi

Ketahanan beton adalah kemampuan untuk memelihara integritas beton dan mempertahankan kekuatan beton dari waktu ke waktu (Saelan dan Wibisono, 2005:79). Hal ini biasanya terjadi pada suatu kebakaran struktur bangunan. Walaupun beton memilki sifat yang tahan adanya api.

Pada struktur yang mengalami kebakaran, kekuatan beton akan dipengaruhi oleh perubahan temperatur, tingkat dan lamanya pemanasan, jenis dan perilaku pembebanan, jenis dan ukuran agregat, dan faktor air semen (Abdul Rohman, 2006:95). Tetapi jika beton mengalami temperatur tinggi dalam waktu yang singkat, tidak membuat kekuatan beton menurun drastis. Begitu juga dengan adanya suhu yang tidak terlalu tinggi tetapi dalam waktu yang lama.

Pada saat suhu pembakaran, keadaan panas yang diterima beton di permukaan berbeda dengan suhu yang ada di tengah suatu beton. Sehingga terkadang tingkat kerusakan beton hanya terjadi di permukaan saja yang ditandai dengan retak rambut. Dalam penelitian ini, suhu beton akan diatur secara homogen sehingga didapat suhu yang rata untuk setiap bagian beton. Beton akan mengalami proses pemanasan dan pendinginan secara bergantian. Panas yang dialami beton akan diterima langsung oleh permukaan beton pada semua sisinya, sedangkan suhu di dalam beton (tengah) masih dingin. Hal ini akan menyebabkan kerusakan pada beton.

Beton yang terkena suhu pembakaran / beton yang terbakar, sebenarnya pada suhu 200°C biasanya struktur beton belum akan terpengaruh, meskipun secara teoretis pada suhu 100°C air yang terkandung dalam pori sudah menguap. Tetapi berhubung air tersebut terjebak di antara pori, maka air tersebut baru akan habis menguap pada suhu 200°C. Pada suhu antara 200°C - 600°C air dalam pori sudah menguap seluruhnya dan meninggalkan pori-pori kosong yang akan mengurangi kuat tekan beton. Meskipun demikian penurunan kuat tekan beton pada fase ini relatif sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Selama pemanasan akan terjadi penguapan air yang terdapat pada pori-pori sehingga tekanan uap pada pori beton akan meningkat dan mengakibatkan terjadi *explosive spalling* yang menyebabkan sebagian segmen beton terlepas dari permukaan beton. Sedangkan pada suhu 700°C - 900°C akan terjadi proses kalsinasi, yaitu CaCO_3 akan berubah menjadi CaO dan CO_2 yang akan mengakibatkan *crack* pada beton sehingga kuat tekannya akan menurun secara signifikan (Sudarmoko, 2000:1).

Pada beton yang belum berumur 28 hari, dimana proses hidrasi panas belum selesai, temperatur tinggi yang mengenai suatu beton tersebut akan menjadikan kuat tekannya tinggi. Hal ini dikarenakan mempercepat proses hidrasi panas tersebut.

2.3.2. Perubahan Sifat Thermal dan Perubahan Warna Akibat Temperatur Tinggi

Akibat temperatur tinggi, maka akan menyebabkan perubahan sifat thermal beton seperti pada tabel 2.1 di bawah ini,

Tabel 2.1 Perubahan Sifat Thermal Beton Akibat Temperatur Tinggi

Jenis Perubahan	Keterangan
Thermal Deformation	Perubahan panas
Spalling	Pengelupasan
Conductivity	Sifat Hantar Panas

Density	Kepadatan
Strength	Kekuatan
Elasticity	Elastisitas
Creep	Rangkak
Stress Strain	Tegangan-Regangan

Sumber: M. Irmawan dkk, 2002 : 135

Selain perubahan sifat-sifat thermal, beton akibat temperatur tinggi akan mengalami perubahan warna dan kerusakan, yakni :

Tabel 2.2 Perubahan Warna, Kondisi dan Kerusakan Beton Akibat Temperatur Tinggi

Suhu	Warna	Kondisi Beton	Kerusakan
0°C - 300°C	Normal	Normal	Normal
300°C - 600°C	Merah jambu	Mengalami Penurunan Kekuatan	Retak rambut
600°C - 900°C	Putih keabu-abuan	Tidak mempunyai Kekuatan lagi	Retak besar
> 900°C	Kuning muda	Tidak mempunyai Kekuatan lagi	Spalling

Sumber: M. Irmawan dkk, 2002 : 135

Akibat pemanasan, beton berubah warna pula. Menurut Hansen T.C (1976), bila beton dipanasi sampai sedikit di atas 300°C, akan berubah warna menjadi merah muda, jika sampai di atas 600°C akan menjadi abu-abu agak hijau, jika sampai di atas 900°C menjadi abu-abu, namun jika sampai di atas 1200°C akan berubah menjadi kuning.

Warna beton yang terbakar dapat menentukan tingkat kebakaran. Seperti warna mulai dari abu-abu sampai merah dapat menunjukkan bahwa kebakaran tersebut cukup parah. Dapat dilihat pada tabel di bawah ini .

Tabel 2.3 Perubahan Warna dan Kondisi Beton Sesuai Perubahan Suhu

Suhu	Warna Beton	Kondisi
0-300°C	Normal	Tidak mengalami penurunan kekuatan
300°C-600°C	Merah jambu	Mengalami penurunan kekuatan
600°C-900°C	Putih keabu-abuan	Tidak mempunyai kekuatan lagi
>900°C	Kuning muda	Tidak mempunyai kekuatan lagi

Sumber: Adang Surahman, 1998

ASTM C 856 menjelaskan bahwa terjadinya perubahan warna pada beton pada variasi temperatur akibat dari terjadinya pergeseran agregat dari keadaan stabil pada temperatur rendah ke keadaan tidak stabil pada temperatur tinggi. Perbedaan –

perbedaan yang terjadi disebabkan oleh factor jenis material yang digunakan dan lama waktu pembakaran.

2.3.3. Kerusakan pada beton akibat temperatur tinggi

Kerusakan beton dapat disebabkan oleh perbedaan angka mulai antara agregat dan pasta semen. Perbedaan ini menyebabkan kerusakan pada interfacial zone sehingga lekatan antar batuan menjadi berkurang banyak. Namun yang paling nyata kerusakan beton mengelupas disebabkan oleh tekanan uap air (5-7%) atau gas yang terperangkap di dalam beton yang dikenal dengan teori *moisture clog spalling*. Beton yang semakin rapat (hal ini berarti mutu beton tinggi dengan nilai faktor air semen yang rendah) akan semakin mudah terjadi pengelupasan oleh panas, karena uap air tidak mudah mengalir melalui pori ke dalam daerah yang lebih dingin (letaknya lebih dalam). Oleh peningkatan temperatur yang cepat diikuti oleh hambatan aliran air di sebelah dalam akan berpotensi timbulnya suatu ledakan (Priyosulistyo,2000:4).

Akibat terjadinya kebakaran pada suatu struktur bangunan, mengakibatkan adanya kerusakan-kerusakan pada beton. Kerusakan-kerusakan tersebut antara lain :

1. Keretakan (cracking)

Sedangkan jenis kerusakan yang sering terjadi pada struktur beton akibat kebakaran antara lain :

- a. Retak Ringan, yakni pecah pada bagian luar beton yang berupa garis-garis yang sempit dan tidak terlalu panjang dengan pola menyebar. Retak ini disebabkan oleh proses penyusutan beton pada saat terjadi kebakaran.
- b. Retak berat, yakni ukuran retak lebih dalam dan lebar, terjadi secara tunggal atau kelompok (Triwiyono, 2000:2).

2. Spalling (pengelupasan)

Spalling dapat diartikan tertekan dengan penampakan bagian permukaan beton yang keluar/lepas/terpisah.

- a. Beton keropos dan kualitas beton buruk
- b. Suhu tinggi akibat kebakaran (Munaf & siahaan, 2003:14)

3. Voids

Lubang-lubang yang cukup dalam atau keropos yang biasanya disebabkan oleh pemadatan saat pelaksanaan yang kurang baik dimana mortar tidak dapat mengisi rongga-rongga antar agregat.

2.4. Retak Susut dan Retak Akibat Perubahan Suhu

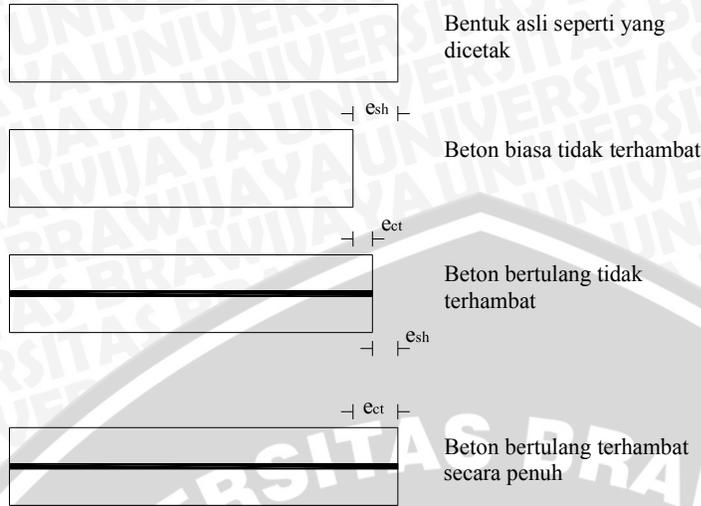
Pada saat beton mengeras, terjadi pengurangan volume (susut) yang kemungkinan besar menyebabkan retak pada beton, tetapi juga memiliki pengaruh yang menguntungkan sebagai penguat pelekatan antara beton dan tulangan baja. Susut mulai terjadi segera setelah beton diaduk, disebabkan pertama-tama karena penyerapan air oleh beton dan agregat. Susut selanjutnya disebabkan oleh penguapan air yang naik ke permukaan beton. Selama proses pembentukan, hidrasi semen menimbulkan sejumlah besar panas dan dengan mendinginya beton, susut lebih lanjut terjadi akibat penurunan panas. Bahkan berbulan-bulan, dan setiap pembasahan dan pengeringan berikutnya dapat menyebabkan muai dan susut. Susut akibat perubahan suhu dapat dikurangi dengan pembatasan suhu selama hidrasi, yang dapat dilakukan dengan prosedur berikut

1. Mempergunakan sustu rencana adukan dengan kadar semen rendah;
2. Menghindarkan pemanasan cepat dan penggunaan semen halus, bila memungkinkan;
3. Menjaga agar agregat dan air pengaduk tetap dingin;
4. Mempergunakan acuan baja dan mendinginkannya dengan siraman air;
5. Membongkar acuan waktu dini untuk memungkinkan panas hidrasi dilepaskan keluar.

Suatu rasio air-semen yang rendah akan membantu mengurangi susut akibat pengeringan dengan menjaga volume air yang dapat hilang pada suatu batas minimum.

Apabila perubahan volume beton dapat berlangsung secara bebas tanpa hambatan, maka tidak akan terjadi perubahan tegangan didalam beton. Hambatan terhadap terjadinya susut, sebaliknya akan menimbulkan tegangan dan regangan tarik.

Tegangan susut yang disebabkan oleh tulangan di dalam suatu bagian konstruksi yang diperlihatkan dalam gambar 2.2 mempunyai regangan susut bebas ϵ_{sh} bila terbuat dari beton biasa, akan tetapi perubahan menyeluruh ini berkurang dengan adanya tulangan, yang memberikan regangan tekan ϵ_{sc} di dalam baja dan menyebabkan suatu regangan tarik efektif ϵ_{ct} di dalam beton.

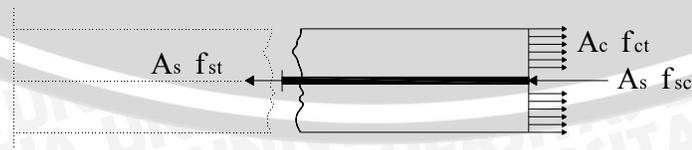


Gambar 2.2. Regangan Susut

Sumber : W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:7

Kalau bagian konstruksi terhambat penuh, maka baja tidak dapat berada dalam tekanan karena $\epsilon_{sc} = 0$ dan karena itu $f_{sc} = 0$. Dalam hal ini regangan tarik yang timbul didalam beton, ϵ_{ct} , harus sama dengan regangan susut bebas ϵ_{sh} dan tegangan yang timbul mungkin akan cukup tinggi untuk menyebabkan retak pada beton yang belum cukup umur. Di mana f_{ct} adalah tegangan tarik didalam beton dengan luas A_c dan f_{sc} adalah tegangan tekan di dalam baja dengan luas A_s .

Pada waktu retak terjadi panjang beton yang tidak retak cenderung untuk mengerat sehingga baja yang dibungkusnya berada dalam keadaan tekan, sedangkan baja di daerah retakan berada dalam keadaan tarik. Keadaan ini disertai dengan pecahnya perlekatan lokal di dekat setiap retakan. Keseimbangan antara beton dan baja tulangan diperlihatkan dalam gambar 2.3 dan perhitungan dapat dikembangkan untuk menghubungkan lebar dan jarak retan.



Gambar 2.3. Gaya Susut di Dekat Sebuah Retakan

Sumber : W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:9

Dari hari ke hari muai beton akibat panas dapat menjadi lebih besar dari pada perubahan yang disebabkan oleh susut. Tegangan dan regangan akibat panas dapat dikontrol dengan menempatkan siar gerak atau siar muai (*movement or expansion joints*) dengan posisi yang betul pada suatu konstruksi.

Apabila tegangan tarik yang disebabkan oleh susut dan perubahan suhu melampaui kekuatan beton, akan terjadi retakan. Untuk mengontrol lebar retak, tulangan baja harus ditempatkan dekat dengan permukaan beton; untuk maksud ini pedoman-pedoman praktek menentukan jumlah minimum tulangan di dalam suatu bagian konstruksi.

Berhubung koefisien muai panas dari baja dan beton (α_s dan α_c) hampir sama besarnya perbedaan perubahan antara baja dan beton akan kacil sekali dan mungkin tidak akan menimbulkan retakan

Seluruh konstruksi beton akibat panas bagaimanapun seringkali efektif dalam menghasilkan retak pertama dalam bagian-konstruksi yang terhambat. Berhubung perubahan suhu yang diperlukan dapat terjadi dengan mudah dalam semalam pada bagian yang baru dicetak, meskipun sudah dalam pengawasan yang baik terhadap panas yang ditimbulkan selama proses hidrasi (W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:6).

2.5. Rangkak (Creep)

Rangkak adalah deformasi kontinu dari suatu bagian konstruksi selama waktu memikul beban. Perilaku yang tepat dari suatu beton tertentu tergantung pada agregat dan rencana adukan, tetapi pola umumnya diilustrasikan dengan meninjau suatu bagian konstruksi yang mengalami tekanan aksial. Karakteristik rangkak adalah :

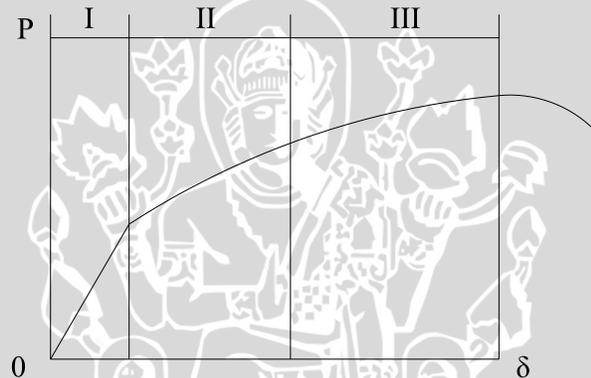
1. Deformasi akhir dari bagian-konstruksi dapat menjadi tiga atau empat kali dari deformasi elastik jangka pendek.
2. Secara kasar, deformasi ini sebanding dengan intensitas pembebanan dan berbanding terbalik dengan kekuatan beton.
3. Apabila beban ditiadakan, hanya deformasi elastik seketika yang akan pulih deformasi plastik tidak.
4. Terdapat redistribusi beban diantara beton dan baja yang ada.

Redistribusi beban ini disebabkan oleh perubahan regangan tekan yang dipindahkan kepada baja tulangan. Jadi tegangan tekan di dalam baja meningkat sehingga baja mengambil bagian beban yang lebih besar.

Pengaruh rangkai terutama penting didalam balok-balok, dimana bertambahnya lendutan mungkin menyebabkan menganganya retakan, merusak lapis penyelesaian dan penempatan tidak segaris dari peralatan mekanis. Redistribusi tegangan diantara beton dan baja mula-mula terjadi dalam daerah tekan yang tidak retak dan mempunyai pengaruh kecil terhadap tulangan tarik selain daripada menurunkan tegangan susut dalam beberapa keadaan. Penyediaan tulangan didaerah tekan dari bagian yang melentur, bagaimanapun seringkali membantu menahan lendutan akibat rangkai (W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:10).

2.6. Perilaku Keruntuhan Balok

Perilaku balok yang dibebani hingga runtuh dinyatakan dengan kurva hubungan antara beban dengan lendutan.



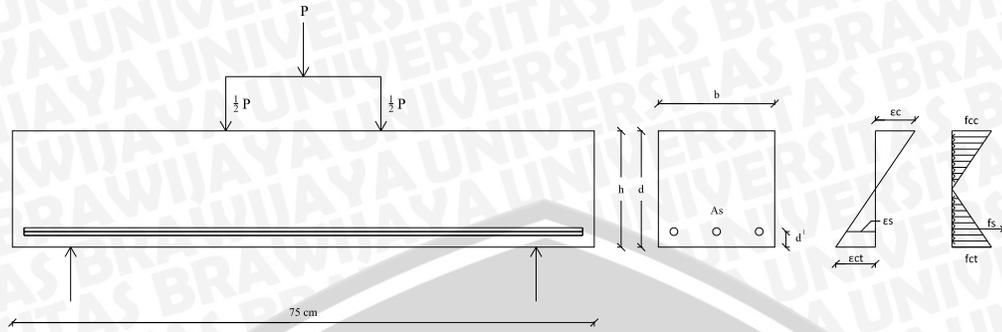
Gambar 2.4. Grafik Hubungan Beban (P) dengan Lendutan (δ) Balok Beton Bertulang yang Didapat dari Hasil Pengamatan

Sumber : Nawy, E.G, 1990 : 256

Taraf keruntuhan menurut Grafik terbagi atas :

2.6.1. Taraf Praretak (Daerah I)

Pada daerah ini batang-batang struktural bebas retak. Kurva beban-lendutan pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok dalam daerah ini lebih kecil dari pada kekuatannya akibat lentur dan besarnya berbanding lurus dengan regangan yang terjadi. Pada pembebanan yang terjadi, selama tegangan tarik maksimum beton lebih kecil dari modulus kehancuran, maka seluruh beton dapat dikatakan efektif dalam memikul tegangan.

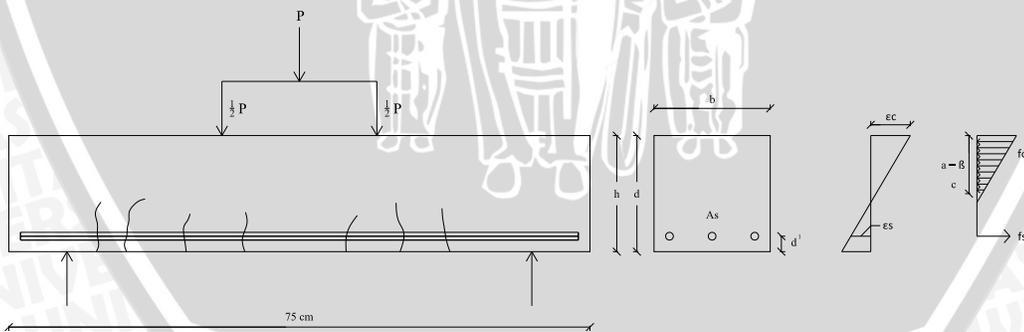


Gambar 2.5. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok Taraf Praretak

Sumber : Winter, 1993 hal. 49

2.6.2. Taraf Beban Pasca Retak (Daerah II)

Apabila beban ditambah terus, maka kekuatan tarik beton akan segera tercapai dan mulai terjadi retak-retak akibat tarik yang menjalar keatas sampai mendekati garis netral. Garis netral tersebut kemudian bergeser keatas kemudian diikuti dengan menjalarnya retak-retak. Apabila sudah terjadi retak lentur, konstribusi kekuatan tarik beton dikatakan sudah tidak ada lagi. Ini berarti kekuatan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban-penurunan didaerah ini semakin landai dibandingkan dengan taraf praretak. Pada taraf ini tegangan balok tidak mencapai kurang lebih sebesar $0,5 f^l_c$, maka hubungan antara tegangan dan regangan akan terus berlangsung mendekati hubungan yang berbanding lurus.

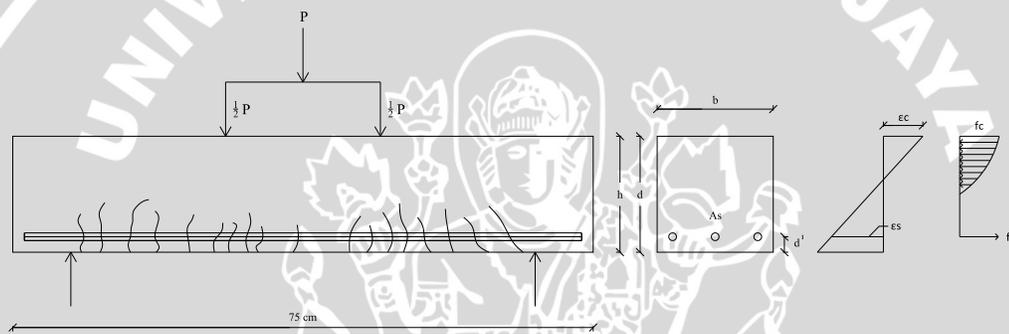


Gambar 2.6. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok Taraf Pasca Retak

Sumber : Winter, 1993 hal. 49

2.6.3. Taraf Retak Pasca-Serviceability dan Keadaan Limit (Daerah III)

Diagram beban-penurunan pada daerah III jauh lebih datar dari pada daerah I dan II yang diakibatkan oleh hilangnya kekakuan penampang karena retak yang sudah cukup banyak dan lebar disepanjang bentang. Apabila beban terus bertambah tegangan dan regangan juga akan naik dan hubungan antara kedua tidak lagi berbanding lurus. Regangan tulangan baja es, pada sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya ϵ_y . Balok yang tulangan tariknya mulai leleh dikatakan mulai runtuh secara struktural. Balok ini terus menerus mengalami defleksi, retaknya semakin terbuka sehingga garis netralnya mendekati serat tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan yang dapat mengakibatkan kehancuran total beton pada daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya kehancuran.



Gambar 2.7. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Taraf Balok Serviceability.

Sumber : Winter, 1993 hal. 49

2.7. Perilaku Retak Beton

Pada struktur bangunan, dewasa ini banyak digunakan bahan-bahan kuat tinggi, termasuk penggunaan bahan beton dan baja tulangan. Apabila komponen struktur terlentur penulangannya menggunakan baja kuat tinggi, agar mencapai tegangan tinggi diperlukan kemampuan regangan yang lebih besar pula baik bagi baja maupun beton. Bagian struktur beton pada daerah yang mengalami tarik umumnya memperlihatkan suatu fenomena retak pada permukaannya. Retak-retak ini tidak merugikan kecuali bila lebar retaknya menjadi melebihi batas, dalam hal ini keawetan beton terganggu karena kondisi tulangnya menjadi terbuka terhadap korosi.

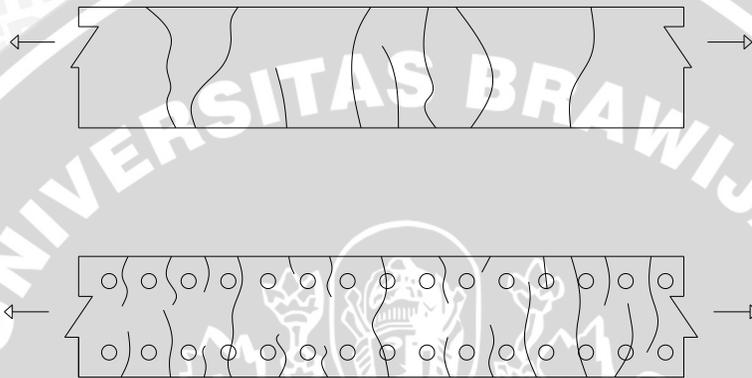
Retak pada beton merupakan kontribusi dan awal dari kesan yang lebih parah lagi yaitu berlangsungnya proses korosi tulanga baja, rusaknya permukaan beton dan dampak kerusakan jangka panjang lainnya. Oleh karena itu pengetahuan perilaku retak

dan pengendalian lebar retak merupakan hal penting dalam memperhitungkan kemampuanlayakan komponen struktur pembebanan jangka panjang.

2.8. Tipe-tipe retak

Tegangan yang disebabkan oleh beban, momen dan geser menyebabkan bermacam model kenampakan pola retak pada beton.

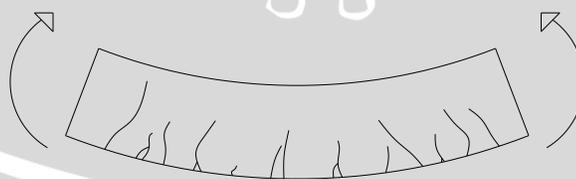
Beton yang mengalami gaya tarik akan mengalami retak sepanjang penampang melintang dengan jarak retak bervariasi antara 0,75 sampai 2 kali ketebalan beton.



Gambar 2.8. Retak Beton Akibat Gaya Tarik.

Suatu beton yang mempunyai ketebalan yang besar dengan perkuatan tulangan di setiap permukaannya akan mempunyai lebar retak permukaan yang kecil pada lapisan yang terdapat perkuatan. Pertemuan retak masing-masing sisi terjadi ditengah-tengah. Dari gambar yang dapat dilihat bahwa lebar retak di B lebih besar daripada di A.

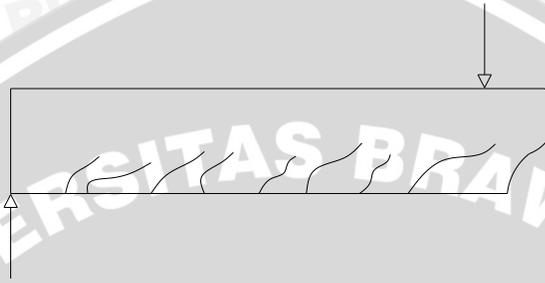
Beton bertulang yang mengalami momen akan mengalami retak seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.9. Retak Beton Akibat Momen.

Dalam hal ini terjadi retak vertikal yang arahnya menuju pada titik beban. Pada balok yang tinggi (3-4 ft) jarak retak relatif lebih dekat dengan sebgayaan retak akan bergabung. Lebar retak di bagian B lebih besar dari pada di A. Retak-retak yang terjadi pada $\frac{1}{3}$ tinggi balok adalah retak lentur.

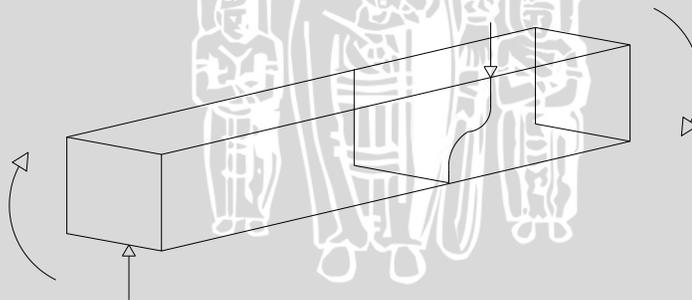
Retak yang disebabkan oleh geser mempunyai karakteristik kenampakan yang miring.



Gambar 2.10. Retak Beton Akibat Geser.

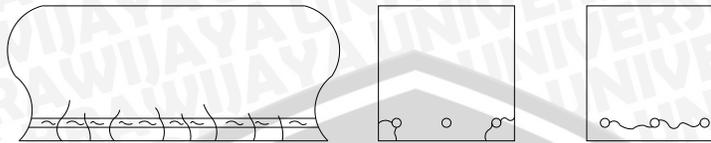
Retak-retak ini setinggi garis netral beton dan kadang-kadang juga sampai pada daerah tekan.

Retak akibat torsi murni akan mengelilingi beton. Pada beton normal yang juga mengalami momen dan geser keretakan cenderung kelihatan pada permukaan dimana terjadi tegangan geser yang menyebabkan penambahan torsi.



Gambar 2.11. Retak Beton Akibat Torsi.

Retak juga bisa terjadi disepanjang tulangan karena pada daerah ini terjadi tegangan yang disebabkan interaksi beton pengikat dengan baja tulangan.



Gambar 2.12. Retak Beton Akibat Tegangan Lekat.

Beban terpusat juga dapat mengakibatkan retak belah atau "retak pecah"



Gambar 2.13. Retak Beton Akibat Tegangan Lekat.

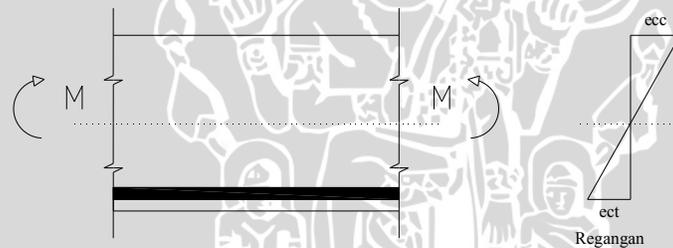
2.9. Retak Lentur

Bagian-bagian konstruksi yang mengalami lentur pada umumnya memperlihatkan suatu rangkaian retak-retak lentur (flexural cracking) yang tersebar walaupun hanya terdapat beban kerja. Retak-retak ini tidak mencolok dan tidak merugikan kecuali bila lebarnya menjadi melebihi batas, dalam hal ini untuk kerja dan keawetan terganggu karena tulangan terbuka terhadap korosi.

Lebar retak yang sesungguhnya di dalam konstruksi beton bertulang akan bervariasi di antara batas-batas yang luas, dan tidak dapat ditafsir secara tepat, jadi syarat pembatasan yang harus dipenuhi adalah bahwa kemungkinan lebar maksimum melampaui sesuatu harga yang memuaskan adalah kecil. Harga maksimum yang dapat diterima dan dianjurkan oleh BS 8110 sebesar 0,3 mm pada saat posisi pada permukaan beton dalam keadaan keliling yang normal, meskipun beberapa pedoman-pedoman lain menganjurkan harga-harga yang lebih rendah untuk bagian-bagian konstruksi yang penting (W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:124).

2.9.1. Mekanisme Retak Lentur

Mekanisme ini dapat digambarkan dengan meninjau perilaku suatu bagian konstruksi yang mengalami momen merata. Suatu panjang balok yang diperlihatkan dalam gambar 2.12 mula-mula akan bersifat elastis seluruhnya, pada saat momen merata M yang dipikul dinaikan. Apabila batas regangan tarik beton tercapai, maka akan terjadi retak, dan daerah tarik yang berdekatan tidak akan dipengaruhi lebih jauh lagi oleh gaya-gaya tarik langsung. Akan tetapi kelengkungan balok menyebabkan tegangan-tegangan tarik langsung selanjutnya menimbulkan retak pada suatu jarak dari retak semula, untuk mempertahankan kesetimbangan-dalam. Ini berturut-turut menyebabkan terjadinya retak-retak lebih lanjut, dan proses ini akan berlanjut sampai jarak antara retak-retak tidak memungkinkan lagi timbulnya tegangan-tegangan tarik yang cukup untuk menyebabkan retak-retak selanjutnya. Retak-retak awal ini disebut retak primer, dan jarak rata-ratanya dalam suatu daerah momen konstan, secara percobaan telah didapatkan sebesar kira-kira $1,67(h-x)$ dan tidak akan dipengaruhi oleh detail tulangan.



Gambar 2.14. Lentur dari Suatu Panjang Balok.

Sumber : W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:125

Bagitu momen yang dipikul meningkat diatas tarik ini, maka terjadinya retak banyak dipengaruhi oleh tulangan. Tegangan-tegangan tarik didalam beton yang mengelilingi batang-batang tulangan disebabkan oleh lekatan, sambil dengan meningkatnya tegangan didalam tulangan. Tegangan-tegangan ini meningkat dengan semakin jauhnya jarak dari retak-retak primer dan mungkin dapat menyebabkan terbentuknya retak-retak lebih lanjut kira-kira di tengah-tengah antara retak-retak primer. Aksi ini mungkin akan berlanjut dengan kenaikan momen sampai lekatan antara beton dan baja tulangan tidak mampu lagi menimbulkan tarikan di dalam beton yang

cukup untuk menyebabkan retak-retak selanjutnya pada jarak di antara retak-retak yang telah ada. Berhubung terjadinya tegangan-tegangan tarik secara langsung disebabkan oleh adanya batang-batang tulangan, maka jarak retak-retak itu akan dipengaruhi oleh jarak-jarak tulangan. Kalau batang-batang tulangan cukup dekat sehingga daerah-daerah pengaruhnya saling menutup, maka retak-retak sekunder akan menyambung melintasi bagian konstruksi, sedang bila sebaliknya, retak-retak ini akan terbentuk hanya didekat batang-batang individu. Dari percobaan-percobaan telah ditetapkan bahwa jarak rata-rata dari retak-retak sepanjang garis yang sejajar dengan, dan pada jarak α_{cr} dari, suatu batang tulangan pokok tergantung pada efisiensi pelekatan, dan dapat diambil sebesar $1,67 \alpha_{cr}$ untuk batang yang diprofilkan, atau $2,0 \alpha_{cr}$ untuk batang bulat polos (W.H.Mosley dan J.H.Bungey, 1989:125).

2.10. Evaluasi Lebar Retak.

Lebar retak yang sesungguhnya di dalam struktur beton bertulang akan bervariasi diantara batas-batas yang tidak dapat ditaksir secara tepat, jadi syarat pembatasan yang harus dipenuhi adalah bahwa kemungkinan lebar maksimum melampaui harga yang memuaskan adalah kecil. Harga maksimum yang dapat diterima dianjurkan sebesar 0,3 mm pada setiap posisi pada permukaan beton dalam keadaan keliling yang normal dan dianjurkan harga yang lebih rendah untuk bagian konstruksi yang penting seperti pada konstruksi penahan air.

Pada evaluasi lebar retak ini, untuk meramalkan besar lebar maximum dan retak yang terjadi pada permukaan tarik suatu gelagar, dipakai rumus :

$$W = 11 \times 10^{-6} \beta f_s (dc \cdot A)^{1/3}$$

(SK SNI 03-284-2002 pasal 10.6 ayat 4)

Dimana:

W = Lebar retak maksimum dan retak yang diberi satuan dalam seperseribu inch. (0,001 inch/ 0,0254 mm)

Fs = Tegangan maximum pada tulangan untuk taraf beban kerja yang apabila tidak dihitung dapat digunakan 0,6 fy

β = Perbandingan jarak dan permukaan tarik dari pusat tulangan terhadap sumbu netral

$$\beta = \frac{h-c}{d-c} \quad \text{dengan } \beta = 1,2$$

dc = Tebal selimut beton sampai pusat tulangan

A = Luas penampang beton yang mengelilingi suatu tulangan

Apabila kuat luluh rencana baja f_y lebih dari 300 Mpa, harus diperhatikan dan dilakukan pemeriksaan secara khusus dalam rangka menjamin bahwa letak atau susunan batang tulangan di daerah tarik telah tersebar secara merata. Untuk balok maupun plat dengan penulangan satu arah, pemeriksaan penyebaran letak batang tulangan baja dilakukan dengan menghitung bilangan z , sebagai berikut:

$$Z = f_s (d_c \cdot A)^{1/3}$$

SK SNI 0,3-284-2002 pasal 10,6 ayat 4

dimana:

z = bilangan sebagai batas penyebaran penulangan lentur dengan batas maximum 30MN/m bagi struktur terlindung dan 25 MN/m untuk struktur terbuka yang terpengaruh oleh cuaca luar.

Pedoman ACI menentukan bahwa z tidak melampaui 175 untuk permukaan yang berada di dalam ruangan dan 145 untuk permukaan yang berada di luar ruangan. Harga batas ini masing-masing berhubungan dengan lebar retak maximum sebesar 0,016 dan 0,813 inch.

2.11. Lebar Retak Izin.

Lebar retak maximum yang diizinkan pada suatu elemen struktur bergantung pada fungsi khusus elemen tersebut dan kondisi lingkungan elemen struktur tersebut. ACI *commitee* 224 memberikan petunjuk mengenai lebar retak maximum yang diizinkan untuk berbagai kondisi lingkungan.

Tabel 2.4 Toleransi Lebar Retak Beton

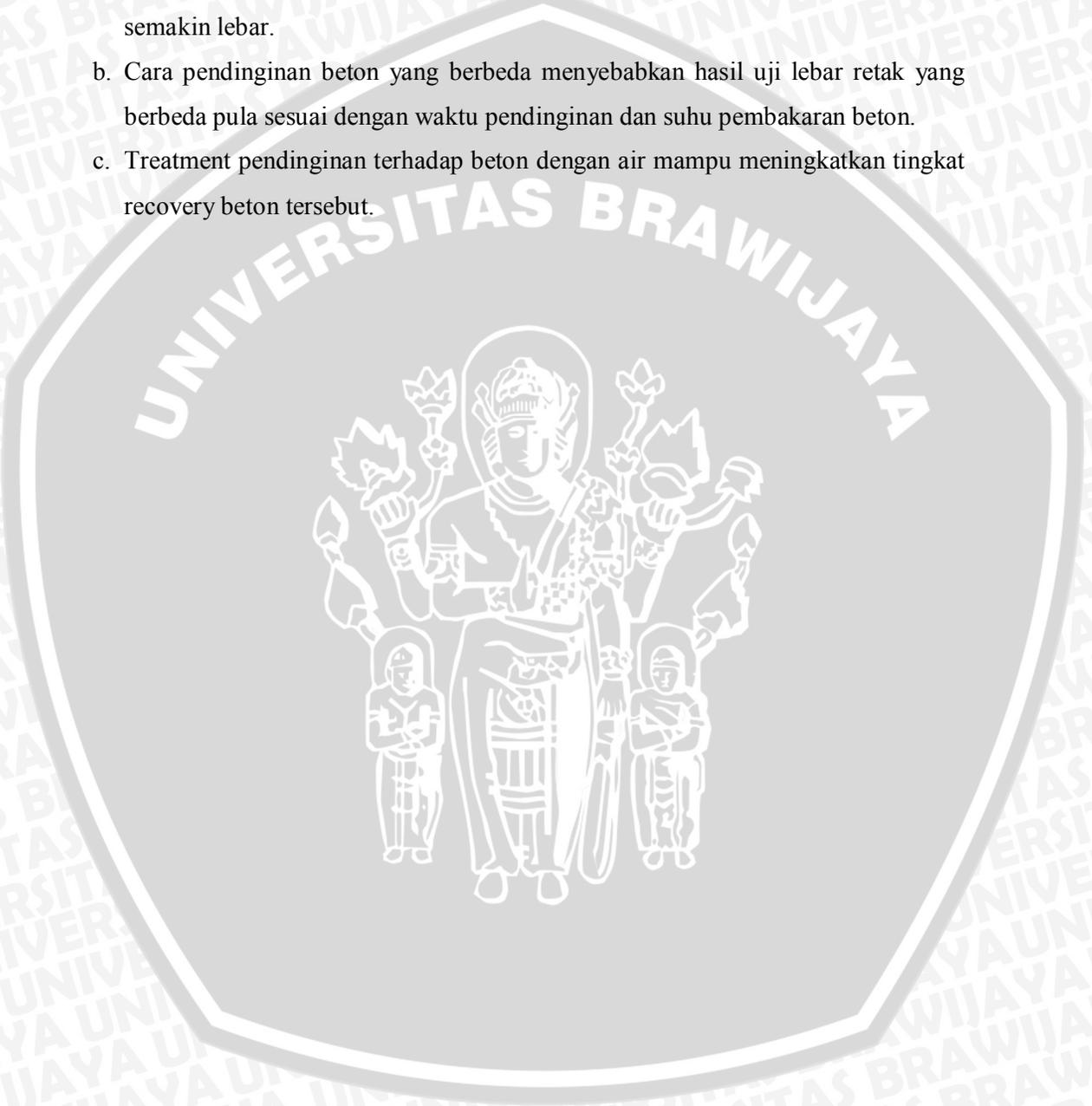
No	Kondisi lingkungan	Lebar Retak	
		inch	mm
1	Udara kering / membran terlindung	0,016	0,41
2	Udara lembab tanah	0,012	0,3
3	Senyawa kimia	0,007	0,18
4	Air laut basah / kering	0,006	0,15
5	Struktur penahan air (tidak termasuk pipa tak bertekanan)	0,004	0,10

Sumber : Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar , G. Nawwy, Edward

2.12. Hipotesis Penelitian.

Hipotesis dari penelitian yaitu akan diteliti lebar retak akibat temperatur tinggi yakni akibat suhu pembakaran dan sifat beton serta proses pendinginannya:

- a. Perubahan suhu yang semakin tinggi menyebabkan lebar retak beton menjadi semakin lebar.
- b. Cara pendinginan beton yang berbeda menyebabkan hasil uji lebar retak yang berbeda pula sesuai dengan waktu pendinginan dan suhu pembakaran beton.
- c. Treatment pendinginan terhadap beton dengan air mampu meningkatkan tingkat recovery beton tersebut.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Pembuatan Benda Uji dan Penelitian

Lokasi pembuatan benda uji dan pembakaran dilakukan pada tempat yang berbeda, antara lain:

- a. Pembuatan benda uji dan pengamatan lebar retak dilakukan di Laboraturium Bahan Kontruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
- b. Pembakaran benda uji dilakukan di pabrik keramik Dinoyo, Malang.

3.2 Bahan dan Peralatan Yang Digunakan

Pada penelitian ini, diperlukan bahan dan peralatan untuk membuat benda uji sampai dengan pengamatan lebar retak balok beton. Bahan alam yang digunakan diperoleh dari sekitar kota Malang.

- a. Bahan yang digunakan untuk penelitian, antara lain :

1. Semen Portland Tipe I (OPC) produksi PT. Semen Gresik
2. Agregat halus dari Pandaan
3. Agregat kasar dari Pandaan
4. Air diperoleh dari jaringan air PDAM Kota Malang

- b. Peralatan pengujian agregat

Peralatan pengujian agregat berdasarkan pada standar spesifikasi agregat beton ASTM C 33 berupa :

1. Pemeriksaan Gradasi Agregat Halus dan Agregat Kasar

Alat – alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Timbangan dan neraca dengan ketelitian 2% berat benda uji
- Satu set saringan : 9,52 mm (3/8”); 4,75 mm (no.4); 2,36 mm (no.8); 1,18 mm (no.16); 0,6 mm (no.30); 0,3 mm (no.50); 0,15 mm (no. 100); 0,075 mm (no. 200)
- Oven dengan kapasitas pengatur suhu (110 ± 5) °C
- Mesin pengguncang saringan
- Talam-talam dan kuas

2. Pemeriksaan Kadar Air Agregat Halus dan Agregat Kasar

Alat – alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Timbangan dengan ketelitian 0,1% berat benda uji
- Oven pengukur suhu kapasitas $(100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$
- Talam

3. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Alat – alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Timbangan kapasitas ≥ 1 kg dengan ketelitian 0.1 gram
- Piknometer dengan kapasitas 500 ml
- Kerucut terpancung dengan diameter atas (40 ± 3) mm, diameter bawah (90 ± 3) mm, dan tinggi (75 ± 3) mm dibuat dari logam tebal ≥ 0.8 mm.
- Batang penumbuk dengan bidang penumbuk rata, berat (340 ± 15) gram dan diameter (25 ± 3) mm.
- Saringan no.4 (4,75 mm)
- Oven pengatur suhu kapasitas $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$
- Desikator

4. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Alat – alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Keranjang kawat ukuran 3,35 mm (no. 6) atau 2,46 mm (no. 8) dengan kapasitas ± 5 kg
- Tempat air dengan kapasitas dan bentuk yang sesuai untuk pemeriksaan. Tempat ini harus dilengkapi dengan pipa sehingga permukaan air selalu tetap
- Timbangan dengan kapasitas 5 kg dengan ketelitian 0,1 % dari berat contoh yang ditimbang dan dilengkapi dengan alat penggantung keranjang.
- Oven pengatur suhu dengan kapasitas $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$
- Saringan no 4 (4,78 mm)

5. Pemeriksaan Berat Isi Agregat Halus dan Agregat Kasar

Alat – alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Timbangan kapasitas ≥ 1 kg dengan ketelitian 0,1 g
- Tongkat tusuk baja panjang ± 600 mm dan diameter ± 16 mm
- Kotak takar

- c. Pembuatan benda uji berdasarkan pada Peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI).

- d. Peralatan pembakaran benda uji adalah oven pembakaran keramik Dinoyo dengan panas maksimum 1000°C.
- e. Peralatan pengujian tegangan tekan balok silinder adalah Mesin uji tekan beton (*Compression Testing Machine*) di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.
- f. Peralatan pengujian tegangan tekan balok beton di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.

Alat – alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Rangka pengujian (*Loading Frame*)
 - Dongkrak hidrolik
 - Proving ring pembacaan beban kapasitas 25 tonqa
- g. Peralatan pengamatan lebar retak adalah *crack detector microscope* di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.

3.3 Tungku Pembakaran

Tungku pembakar / ruang pembakar terbuat dari bata tahan api yang dilapisi besi pada bagian luarnya dengan ukuran bersih 2 x 1,5 x 1,5 meter³ dan dilengkapi mesin pembakar (burner machine) yang mempunyai 4 sumber api yang terpasang di bagian bawah, dengan susunan 2 di bagian depan dan 2 lagi di bagian belakang, Termokopel adalah sensor suhu yang banyak digunakan untuk mengubah perbedaan panas dalam benda yang diukur temperaturnya menjadi perubahan potensial/ tegangan listrik (voltase). Termokopel yang sederhana dapat dipasang, dan memiliki jenis konektor standar yang sama, serta dapat mengukur temperatur dalam jangkauan suhu yang cukup besar dengan batas kesalahan pengukuran kurang dari 1 °C. serta termometer pengontrol.

Seluruh benda uji dibuat sesuai rancangan percobaan yang direncanakan. Kemudian dilakukan perawatan sampai mencapai umur beton yang diinginkan, kemudian benda uji dimasukkan ke dalam tungku pembakaran. Suhu ruangan yang tercatat di termometer pengontrol adalah 27°C. Setelah itu api dinyalakan pada keempat sisi tungku pembakaran, kemudian api menjalar ke benda uji (beton). Untuk bahan bakar yang digunakan tungku pembakaran menggunakan tabung gas LPG.

3.4 Prosedur Pembuatan Benda Uji

Benda uji balok beton dengan tulangan dan tanpa tulangan dibuat dengan prosedur tertentu, terutama ditentukan dulu tegangan karakteristik f'_c sebagai mutu rencana beton, nilai slump dan lain – lain, dengan prosedur :

1. Mutu benda uji ditentukan pada $f'_c = 25$ Mpa, dan FAS = 0.5, dengan slump 12cm.
2. Setelah agregat halus dan agregat kasar dilakukan uji ayakan dan berat volume didapatkan, maka akan didapat data diameter agregat kasar maksimum, berat volume dalam keadaan SSD, dan kemampuan absorbsinya. Agregat halus didapatkan modulus halusnnya.
3. Dari data tersebut, dibuat rencana campuran dari beton terhadap berat PC, agregat halus dan agregat kasar.
4. Setelah perbandingan berat PC, agregat halus dan agregat kasar didapat, maka dibuat campuran beton.
5. Sebelum campuran beton dicor ke dalam cetakan benda uji, maka diuji nilai slump campuran, setidaknya harus memenuhi slump rencana ± 2 cm.
6. Setelah benda uji dilepas dari cetakan, maka dirawat dengan membalut dengan kain basah minimal 7 hari.

Tabel 3.1. Rancangan pembuatan benda uji

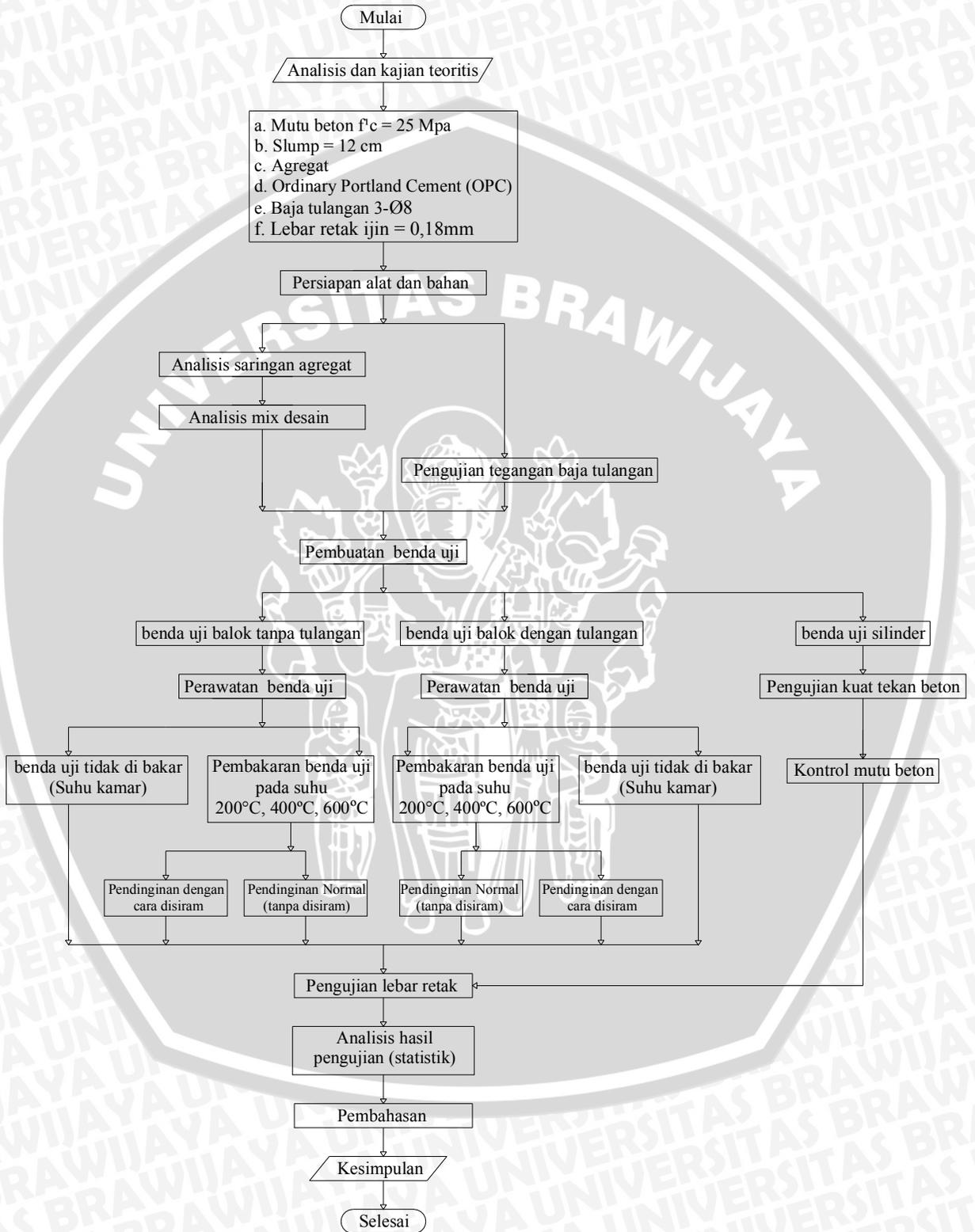
Benda uji	Balok ukuran 15 cm x 15 cm x 75 cm													
	Balok dengan tulangan						Balok tanpa tulangan							
No benda uji	I	II		III		IV		V	VI		VII		VIII	
Suhu pembakaran	Tidak dibakar (27°C)	200°C		400°C		600°C		Tidak dibakar (27°C)	200°C		400°C		600°C	
Jenis perlakuan	-	S	N	S	N	S	N	-	S	N	S	N	S	N
Jumlah benda uji	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Total benda uji	42													

Keterangan :

S = perlakuan disiram

N = perlakuan normal

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Pengerjaan Penelitian

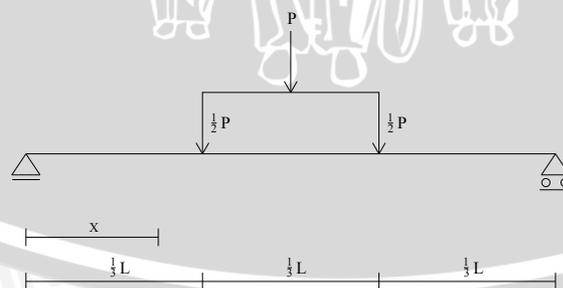
3.6. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menguji beban pada saat lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 setrip sebelum runtuh akibat temperatur tinggi yaitu 200°C, 400°C dan 600°C. Pada umur setelah 28 hari dan akan dilakukan penyiraman setelah beton dibakar pada suhu yang telah ditetapkan.

Sebelum benda uji dibakar, dilakukan penimbangan seluruh benda uji dengan tujuan untuk mengetahui berat sebelum dibakar. Setelah benda uji dibakar dan dikeluarkan dari tungku pembakaran, kemudian benda uji tersebut ditimbang lagi untuk mengetahui berat benda uji (beton) tersebut setelah terkena suhu tinggi. Benda uji normal (tidak dibakar) ditimbang juga beratnya dan benda uji ini digunakan sebagai pembanding terhadap beton yang diberi dua perlakuan yang berbeda (disiram dan tidak disiram).

Untuk pengujian lebar retak beton data diambil dengan mengambil benda uji berbentuk balok dengan tulangan dan balok tanpa tulangan. Dengan dimensi balok 150 mm x 150 mm x 750 mm sebanyak 3 buah benda uji untuk tiap variasi temperatur yaitu 200°C, 400°C dan 600°C dengan dua perlakuan pendinginan yaitu disiram dan tidak disiram. Dan 3 buah benda uji untuk beton yang tidak dibakar sebagai pembanding. Jadi keseluruhannya 42 buah.

Data lebar retak diperoleh dengan mengamati lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 setrip sebelum runtuh. Kemudian dicoba dibandingkan lebar retak antara balok beton dengan variasi suhu dan variasi pendinginan.



Gambar 3.2. Statika Pembebanan

3.7. Perawatan, Pembakaran serta Perlakuan Pendinginan Benda Uji

Setelah pengecoran dilakukan perawatan (curing) terhadap benda uji beton dengan cara membalut benda uji menggunakan kain basah minimal 7 hari, kemudian hingga mencapai umur 28 hari dilakukan pembakaran benda uji dengan cara benda uji dimasukan ke dalam tungku pembakaran. Suhu ruangan yang tercatat di termometer pengontrol adalah 27°C. Setelah itu api dinyalakan pada keempat sisi tungku pembakaran, kemudian api menjalar ke benda uji (balok beton). Untuk bahan bakar yang digunakan tungku pembakaran menggunakan tabung gas LPG. Pembakaran benda uji dilakukan dengan variasi suhu yaitu 200°C, 400°C dan 600°C.

3.7.1. Perlakuan pendinginan benda uji dengan cara penyiraman

Setelah benda uji dikeluarkan dari tungku pembakaran sesuai dengan suhu yang diinginkan, kemudian 3 benda uji di tiap-tiap suhu diberikan perlakuan penyiraman selama 1 jam. Perpindahan suhu benda uji dari suhu 200°C, 400°C dan 600°C ke air pada suhu ruangan 27°C secara mendadak menjadikan air mendidih dan beton mengalami keretakan.

3.7.2. Perlakuan pendinginan benda uji dengan cara normal (tanpa penyiraman)

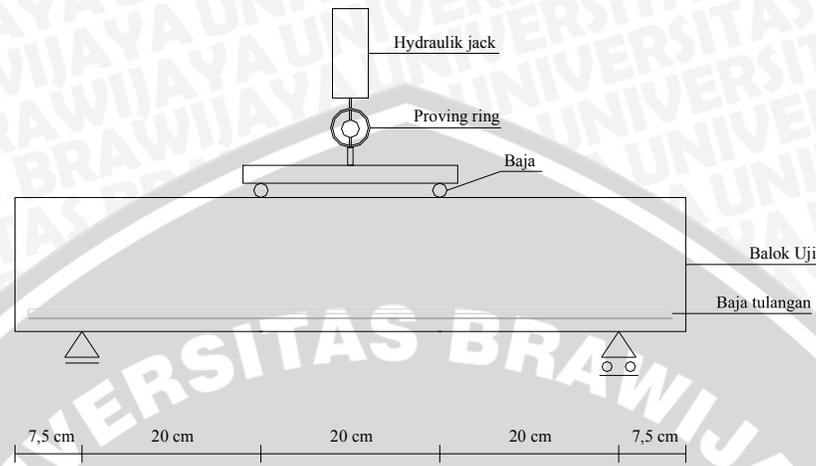
Pendinginan normal yang dimaksud adalah pendinginan tanpa adanya penyiraman selama 1 jam. Setelah benda uji dikeluarkan dari tungku pembakaran sesuai dengan suhu yang diinginkan, diambil 3 benda uji di tiap-tiap suhu yang diberi perlakuan pendinginan tanpa adanya penyiraman pada suhu ruangan 27°C selama 1 jam.

3.8. Prosedur Penelitian

Pengujian dilakukan setelah balok beton mengalami perlakuan pendinginan sampai suhu ruangan (27°C). Kemudian balok uji ditempatkan pada rangka pembebanan (*loading frame*) dengan ditumpu sendi-roll pada kedua ujungnya. Balok uji diberikan dua beban terpusat vertikal yang sama besar.

Beban terpusat vertikal yang dikerjakan pada balok dikerjakan oleh pompa hidrolik. Penambahan beban dibaca pada alat *strain meter*. Setelah peralatan benda uji siap pada rangka pengujian, pembebanan segera dilakukan secara berangsur-angsur dari

beban LCD ke nol sampai dengan mencapai beban LCD maksimum, saat balok uji mengalami keruntuhan.



Gambar 3.3. Diagram Pengerjaan Penelitian

Langkah-langkah pengujian :

1. Balok uji ditempatkan pada rangka pembebanan (*loading frame*) dengan ditumpu sendi-roll pada kedua ujungnya. Balok uji diberikan dua beban terpusat vertikal yang sama besar.
2. Benda uji I, II, III, IV (balok dengan tulangan) dengan variasi pembakaran dibebani secara bertahap setiap 1 strip untuk lebar retak yang paling besar pada kondisi beban tersebut dan setiap 5 strip untuk keseluruhan lebar retak yang terjadi. Pengamatan lebar retak dilakukan dari awal terjadi retak sampai balok runtuh, sehingga diperoleh lebar retak 1 setrip sebelum runtuh.
3. Benda uji V, VI, VII, VIII (balok tanpa tulangan) dengan variasi pembakaran dibebani secara bertahap setiap 1 strip untuk lebar retak yang paling besar pada kondisi beban tersebut dan setiap 5 strip untuk keseluruhan lebar retak yang terjadi. Pengamatan lebar retak dilakukan dari awal terjadi retak sampai balok runtuh, sehingga diperoleh lebar retak 1 setrip sebelum runtuh.
4. Pembacaan beban pada alat *strain meter*.
5. Pembacaan lebar retak menggunakan *microscope crack detector*.

3.9. Variabel Penelitian

Variabel yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah variabel bebas dan variabel tak bebas.

1. Variabel bebas (*independent variabel*)

Variabel bebas adalah variabel yang perubahannya bebas ditentukan peneliti. Dalam penelitian ini, yang merupakan variabel bebas adalah *treatment* pendinginan dan suhu pembakaran.

2. Variabel tak bebas (*dependent variabel*)

Variabel tak bebas adalah variabel yang perubahannya tergantung pada variabel bebas. Dalam penelitian ini, yang merupakan variabel tak bebas adalah hasil uji lebar retak.

3.10. Metode Pengambilan Data

Pengumpulan data benda uji dilakukan dengan membuat benda uji dengan tulangan dan tanpa tulangan masing-masing sebanyak 3 balok yang tidak mengalami pembakaran sebagai balok kontrol. Pengambilan data dilakukan dengan mengamati lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 setrip sebelum runtuh. Kemudian dicoba dibandingkan lebar retak antara balok beton dengan variasi suhu dan variasi pendinginan.

3.11. Analisis Statistik

Setelah data-data beban pada saat lebar retak ijindiperoleh, maka dilanjutkan dengan analisa secara statistik yang bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh perlakuan pendinginan dan temperatur terhadap lebar retak beton. Adapun proses analisisnya adalah sebagai berikut :

3.11.1. Normalitas

Uji normalitas digunakan untuk mengetahui nilai variabel-variabel yang diperoleh dari data hasil pengamatan terdistribusi normal atau mendekati normal. Salah satu metode yang digunakan dalam menganalisis populasi yang terdistribusi normal yaitu uji kenormalan *Kolmogrov-Smirnov Goodness of Fit Test*. Proses pengujianya menggunakan program SPSS. Indikator penentu diterima atau ditolaknya Hipotesis nol (H_0) adalah dengan melihat tingkat probabilitas. Dengan H_0 : Sampel berasal dari populasi berdistribusi normal, H_1 : Sampel tidak berasal dari populasi berdistribusi

normal. Dengan demikian, ditetapkan taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$), jika signifikansi yang diperoleh $> \alpha$, maka sampel berasal dari populasi yang berdistribusi normal. Dan jika signifikansi yang diperoleh $< \alpha$, maka sampel bukan berasal dari populasi yang berdistribusi normal. Apabila data yang diperoleh sudah terdistribusi normal atau mendekati normal maka dilanjutkan dengan analisis variasi.

3.11.2. Homogenitas

Uji homogenitas digunakan untuk mengetahui bahwa dua atau lebih kelompok data sampel berasal dari populasi yang memiliki variasi yang sama. Proses pengujianya menggunakan program SPSS. Interpretasi dilakukan dengan memilih salah satu statistik yaitu statistik yang didasarkan pada rata-rata (*Based on Mean*). Indikator penentu diterima atau ditolaknya Hipotesis nol (H_0) adalah dengan melihat tingkat probabilitas. Dengan H_0 : Variasi pada tiap kelompok sama (homogen), H_1 : Variasi pada tiap kelompok tidak sama (tidak homogen). Dengan demikian, ditetapkan taraf signifikansi ($\alpha=0,05$), jika signifikansi yang diperoleh $> \alpha$, maka variasi setiap sampel sama (homogen). Dan jika signifikansi yang diperoleh $< \alpha$, maka variasi setiap sampel tidak sama (tidak homogen). Apabila data yang diperoleh sudah terdistribusi normal atau mendekati normal maka dilanjutkan dengan analisis variasi.

3.11.3. Pengujian Hipotesis

Merupakan bab yang penting, karena dari pengujian ini akan diketahui apakah suatu pernyataan mengenai populasi itu benar atau tidak. Salah satu teknik dalam mengestimasi hipotesa ini digunakan analisa varian (*ANOVA*), yaitu metode penganalisaan berdasarkan pada varian dari semua observasi, sehingga penyebab kesalahan akibat interaksi, masing-masing kelompok sampel dapat diperhitungkan variabilitasnya. Analisa varian pada penelitian ini menggunakan analisis varian dua arah (*two way - ANOVA*). Uji *ANOVA* yang digunakan untuk menguji hipotesa nol lazim juga disebut dengan uji F. Harga F diperoleh dari rata-rata jumlah kuadrat antara kelompok yang dibagi dengan rata-rata jumlah kuadrat dalam kelompok.

Analisa data hasil pengujian dilakukan dengan model analisis varian dua arah dan analisa regresi. Pernyataan ada tidaknya pengaruh variasi perlakuan pendinginan dan suhu terhadap kuat tekan beton dinyatakan secara statistik sebagai berikut :

$$Y = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha,\beta)_{ij} + \xi_{ij}$$

- Dimana :
- α = Pengaruh perlakuan pendinginan
 - β = Pengaruh suhu
 - (α, β) = Pengaruh interaksi kedua faktor
 - ξ_{ij} = Kesalahan

Ketiga hipotesis tersebut disusun menjadi :

1. $H_0^1 : \mu \alpha_1 = \mu \alpha_2 = \dots = \mu \alpha_i$
 $H_1^1 : \mu \alpha_1 \neq \mu \alpha_2 \neq \dots \neq \mu \alpha_i$
2. $H_0^2 : \mu \beta_1 = \mu \beta_2 = \dots = \mu \beta_i$
 $H_1^2 : \mu \beta_1 \neq \mu \beta_2 \neq \dots \neq \mu \beta_i$
3. $H_0^3 : (\mu \alpha \beta)_{11} = (\mu \alpha \beta)_{12} = \dots = (\mu \alpha \beta)_{ij}$
 $H_1^3 : (\mu \alpha \beta)_{11} \neq (\mu \alpha \beta)_{12} \neq \dots \neq (\mu \alpha \beta)_{ij}$

Dengan :

- H_0 = Hipotesis yang menyatakan bahwa tidak terdapat pengaruh dari variasi perlakuan pendinginan (H_0^1), suhu (H_0^2) atau interaksi keduanya (H_0^3)
- H_1 = Hipotesis yang menyatakan bahwa terdapat pengaruh dari variasi perlakuan pendinginan (H_1^1), suhu (H_1^2) atau interaksi keduanya (H_1^3)
- μ = Rerata nilai yang diukur dalam suatu kelompok perlakuan

Dari analisa statistik tersebut dapat dilihat dari nilai signifikansi atau dengan nilai F. Jika nilai signifikansi $< 0,05$ maka tolak H_0 dan terima H_1 , atau dengan nilai F_{hitung} dan F_{tabel} . Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka tolak H_0 dan terima H_1 , berarti ada pengaruh variasi perlakuan pendinginan dan suhu terhadap nilai lebar retak beton pada penelitian ini. Demikian juga apabila $F_{hitung} < F_{tabel}$, maka kesimpulan yang terjadi adalah sebaliknya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Kalor dan Lamanya Kalor Merambat

4.1.1 Perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat kondisi di lapangan

Pada kondisi di lapangan atau pada saat penelitian ini dilakukan waktu yang dibutuhkan untuk membakar beton di tiap suhu berbeda-beda. Untuk benda uji dengan suhu 200 °C diperlukan waktu ± 45 menit, suhu 400 °C diperlukan waktu ± 1 jam 30 menit, dan suhu 600 °C ± 4 jam. Jarak rentang waktu yang diperlukan untuk tiap-tiap suhu sangat jauh karena semakin meningkatnya suhu, panas merambat agak lambat dari suhu semula.

Tabel 4.1 Waktu yang Dibutuhkan Saat Pembakaran Benda Uji Beton

Suhu (°C)	Waktu (menit)
27	0
200	± 45
400	± 90
600	± 240

4.1.2 Perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat secara teoritis

Sifat thermal dari material beton dipengaruhi oleh kecepatan transfer suhu pada konstruksi saat terjadi kebakaran dan tergantung juga pada sifat konduktivitas suhu dan dinyatakan sebagai *thermal conductivity* dari material zat padat. Adapun variabel-variabel yang mempengaruhi perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat, adalah sebagai berikut :

q = laju perpindahan kalor (Watt)

k = konduktivitas termal (beton)

A = luas permukaan

∂T = selisih waktu

∂x = setengah tinggi balok

ρ = massa jenis

h = koefisien panas

C = panas spesifik

τ = lamanya panas merambat/waktu yang diperlukan

T = suhu yang diinginkan

T_{\sim} = suhu lingkungan

T_o = suhu benda

Di bawah ini adalah perhitungan kalor dan lamanya kalor tersebut merambat untuk setiap suhu yang diinginkan :

1. Suhu 200°C

$$k = 0,8 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$A = S^2 = 15^2 = 225 \text{ cm}^2 = 0.0225 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Maka : } q &= -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0.8 \cdot 0.0225 \text{ m}^2 \cdot \frac{(200-27)^{\circ}\text{C}}{0.075\text{m}} \\ &= 41.52 \text{ W} \end{aligned}$$

Waktu yang diperlukan :

$$T_o = 27^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\sim} = 191^{\circ}\text{C}$$

$$T = 200^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{T - T_o}{T_{\sim} - T_o} = e^{-(h.A / \rho.C.V).\tau}$$

$$\begin{aligned} \frac{h.A}{\rho.C.V} &= \frac{10\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot (0,15^2)\text{m}^2}{1900\text{kg/m}^3 \cdot 460\text{J/kg}^{\circ}\text{C} \cdot (0,75 \cdot 0,15 \cdot 0,15)} \\ &= 1,5256 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\frac{(200 - 27)}{(191 - 27)} = e^{1,5256 \cdot 10^{-5} \cdot \tau}$$

$$\tau = 3501,912 \text{ detik} = 58,365 \text{ menit} = 0,973 \text{ jam}$$

2. Suhu 400°C

$$k = 0,8 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$A = S^2 = 15^2 = 225 \text{ cm}^2 = 0.0225 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Maka : } q &= -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0.8 \cdot 0.0225 \text{ m}^2 \cdot \frac{(400-200)^{\circ}\text{C}}{0.075\text{m}} \\ &= 48 \text{ W} \end{aligned}$$

Waktu yang diperlukan :

$$T_o = 27^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\sim} = 375^{\circ}\text{C}$$

$$T = 400^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{T - T_0}{T - T_{\infty}} = e^{-(h.A / \rho.C.V).\tau}$$

$$\frac{h.A}{\rho.C.V} = \frac{10W/m^2 \cdot ^\circ C \cdot ((2\pi \cdot 0,075^2 + 2\pi \cdot 0,075 \cdot 0,3))m^2}{1900kg/m^3 \cdot 460J/kg^\circ C \cdot (\pi \cdot 0,075^2 \cdot 0,3)}$$

$$= 1,5256 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{(400 - 27)}{(375 - 27)} = e^{1,5256 \cdot 10^{-5} \cdot \tau}$$

$$\tau = 4547,453 \text{ detik} = 75,791 \text{ menit} = 1,263 \text{ jam}$$

3. Suhu 600°C

$$k = 0,8 \text{ W/m} \cdot ^\circ C$$

$$A = S^2 = 15^2 = 225 \text{ cm}^2 = 0.0225 \text{ m}^2$$

$$\text{Maka : } q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0.8 \cdot 0.0225 \text{ m}^2 \cdot \frac{(600 - 400)^\circ C}{0.075 \text{ m}}$$

$$= 48 \text{ W}$$

Waktu yang diperlukan :

$$T_0 = 27^\circ C$$

$$T_{\infty} = 481^\circ C$$

$$T = 600^\circ C$$

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-(h.A / \rho.C.V).\tau}$$

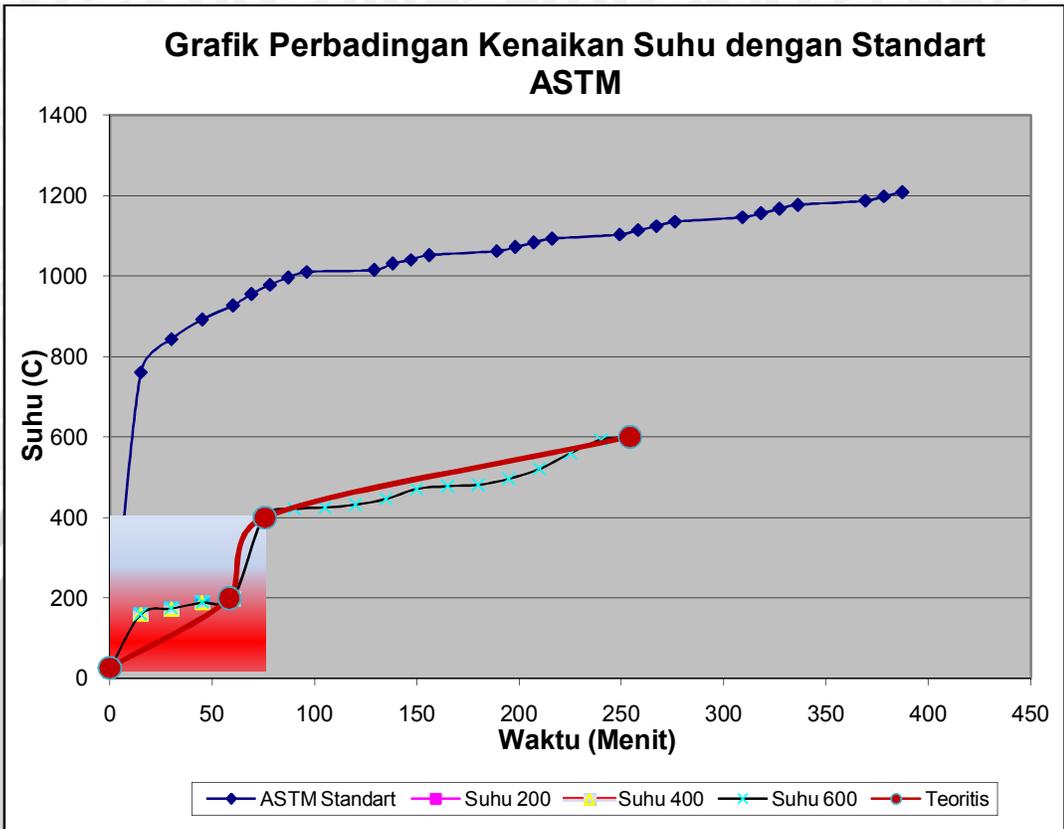
$$\frac{h.A}{\rho.C.V} = \frac{10W/m^2 \cdot ^\circ C \cdot ((2\pi \cdot 0,075^2 + 2\pi \cdot 0,075 \cdot 0,3))m^2}{1900kg/m^3 \cdot 460J/kg^\circ C \cdot (\pi \cdot 0,075^2 \cdot 0,3)}$$

$$= 1,5256 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{(600 - 27)}{(481 - 27)} = e^{1,5256 \cdot 10^{-5} \cdot \tau}$$

$$\tau = 15258,817 \text{ detik} = 254,314 \text{ menit} = 17,862 \text{ jam}$$

4.1.3 Perhitungan kalor dan lamanya kalor merambat menurut standar ASTM



Gambar 4.1. Perbandingan perubahan suhu standart, penelitian dan teoritis

Berdasarkan gambar diatas dapat dapat dijelaskan bahwa lamanya durasi waktu pembakaran dari hasil penelitian dibandingkan dengan suhu standart ASTM dapat disebabkan oleh perbedaan tungku pembakaran yang dipakai, hal ini dapat dilihat dari cepatnya kenaikan temperatur berdasarkan suhu standart ASTM yang dimana untuk mencapai suhu $\pm 600^{\circ}\text{C}$ pembakaran berdasarkan suhu standart ASTM, hanya membutuhkan waktu ± 15 menit atau 0,25 jam. Sedangkan berdasarkan hasil penelitian dibutuhkan waktu lebih lama, yaitu ± 240 menit atau 4 jam. Oleh karena itu, pengaruh alat pembakaran yang digunakan terhadap kenaikan suhu pada pembakaran benda uji beton sangat mempengaruhi durasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu yang diinginkan.

4.2 Pengujian Kuat Tekan Beton

Beton di uji menggunakan alat *Commprression Testing Machine*, perhitungan kuat tekan benda uji (silinder) pada hari ke-7, hari ke-14, hari ke-21, hari ke-28 dapat dilihat pada table-tabel berikut:

Tabel 4.2 Hasil Kuat Tekan Hari ke-7

No Sampel	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)	Rata-rata Beban (kN)	Kuat Tekan (Mpa)
1	12.59	331	227.3	12.87
2	12.81	152		
3	12.76	212		
4	12.68	189.8		
5	12.93	218		
6	12.77	261		

Tabel 4.3 Hasil Kuat Tekan Hari ke-14

No Sampel	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)	Rata-rata Beban (kN)	Kuat Tekan (Mpa)
1	12.55	331	260.05	14.72
2	12.7	162		
3	12.6	326		
4	12.4	184.3		
5	12.1	315		
6	12.4	242		

Tabel 4.4 Hasil Kuat Tekan Hari ke-21

No Sampel	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)	Rata-rata Beban (kN)	Kuat Tekan (Mpa)
1	12.5	343.7	327.817	18.56
2	12.6	298.3		
3	12.8	335.2		
4	12.1	339.2		
5	12.55	266.5		
6	12.45	384		

Tabel 4.5 Hasil Kuat Tekan Hari ke-28

No Sampel	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)	Rata-rata Beban (kN)	Kuat Tekan (Mpa)
1	12.43	438.1	418.072	23.67
2	12.27	384.81		
3	12.3	423.12		
4	12.61	426.2		
5	12.83	395.1		
6	12.69	441.1		

4.3 Perubahan Fisik Beton

4.3.1 Perubahan Warna

Berdasarkan hasil penelitian yang ditunjukkan pada tabel 4.6 dapat dituliskan secara garis besar perubahan warna yang terjadi untuk masing-masing benda uji yang diwakilkan pada tiap-tiap suhu, yakni :

Tabel 4.6 Perubahan Warna

Suhu	Perubahan Warna
200°C	Abu - abu keputihan
400°C	Abu – abu kecoklatan
600°C	Coklat susu dengan bintik-bintik merah tua

Perubahan warna tersebut terjadi setelah masing-masing benda uji beton terkena temperatur tinggi pada tiap-tiap suhu. Dalam pengamatan yang dilakukan secara visual, warna beton yang terbakar dapat menentukan tingkat kebakaran. Seperti warna mulai dari abu-abu sampai merah dapat menunjukkan bahwa kebakaran tersebut cukup parah, akan tetapi tidak dapat dijadikan patokan seutuhnya.

4.3.2 Perubahan Kerusakan Beton

Berdasarkan hasil penelitian yang ditampilkan pada tabel 4.1.5, dapat dituliskan kerusakan-kerusakan apa saja yang terjadi pada masing-masing benda uji yang diwakilkan pada tiap-tiap suhu, yakni :

Tabel 4.7 Kerusakan pada Beton

Cara Pendinginan	Suhu	Kerusakan Yang Terjadi
Biasa	200°C	Retak rambut mulai terlihat
	400°C	Retak rambut dan retak besar
	600°C	Retak dan mulai mengelupas
Disiram	200°C	Retak rambut
	400°C	Retak rambut, retak besar.
	600°C	Terkelupas

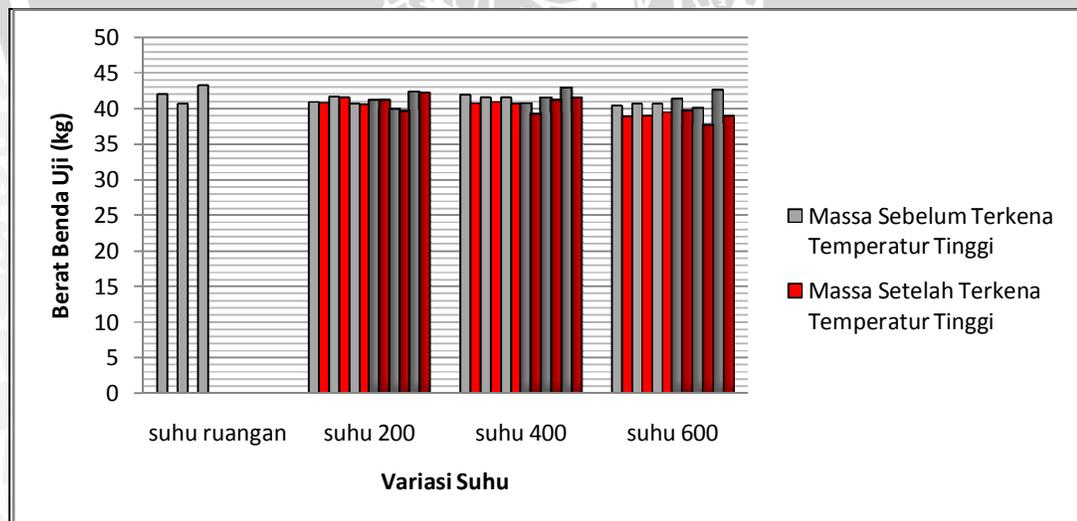
Kerusakan-kerusakan yang timbul pada beton seperti yang terjadi pada hasil penelitian di atas terjadi karena selama pemanasan akan terjadi penguapan air yang terdapat pada pori-pori sehingga tekanan uap pada pori beton meningkat dan mengakibatkan terjadinya kerusakan pada permukaan serta bagian-bagian beton.

4.4 Penurunan Berat Akibat Temperatur

Perhitungan penurunan berat untuk beton bertulang dan beton tanpa tulangaa yang terkena suhu pembakaran tinggi dapat dilihat pada tabel berikut. Dari hasil perhitungan tabel tersebut, dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu yang tercapai pada saat pembakaran, maka semakin cepat terjadi penurunan berat untuk masing-masing benda uji beton. Hal ini dikarenakan semakin tinggi suhu, maka penguapan air dalam beton semakin tinggi pula.

Tabel 4.8 Penurunan Berat Beton Bertulang Akibat Temperatur Tinggi

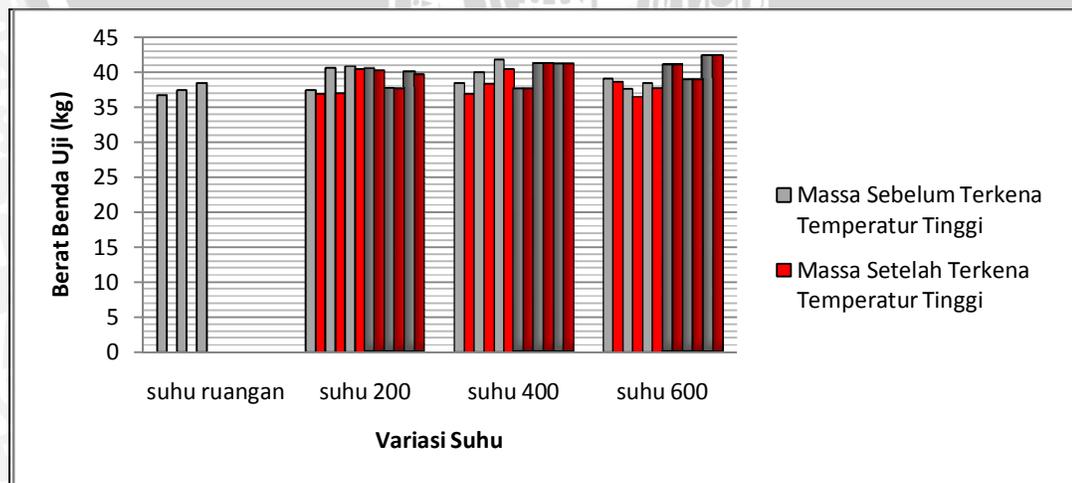
Cara Pendinginan	Suhu	No Sampel	Massa Sebelum Terkena Temperatur Tinggi (kg)	Massa Setelah Terkena Temperatur Tinggi (kg)	Penurunan Berat (Kg)	Presentasee Penurunan Berat (%)
-	Suhu Kamar (Tidak Dibakar)	42	42	-	-	-
		54	40.65	-	-	-
		32	43.3	-	-	-
Disiram	200°C	35	40.9	40.85	0.05	0.122
		36	41.7	41.6	0.1	0.240
		44	40.7	40.55	0.15	0.369
	400°C	45	41.9	40.75	1.15	2.745
		43	41.6	40.95	0.65	1.563
		47	41.6	40.65	0.95	2.284
	600°C	30	40.4	38.9	1.5	3.713
		38	40.7	38.95	1.75	4.300
		40	40.7	39.5	1.2	2.948
Biasa	200°C	55	41.05	41	0.05	0.122
		53	39.8	39.5	0.3	0.754
		51	42.2	42	0.2	0.474
	400°C	49	40.6	39	1.6	3.941
		48	41.4	41	0.4	0.966
		39	42.8	41.35	1.45	3.388
	600°C	41	41.2	39.6	1.6	3.883
		33	39.9	37.5	2.4	6.015
		31	42.5	38.8	3.7	8.706



Gambar 4.2. Perbandingan Penurunan Berat Beton Bertulang Akibat Temperatur Tinggi

Tabel 4.9 Penurunan Berat Beton Tanpa Tulangan Akibat Temperatur Tinggi

Cara Pendinginan	Suhu	No Sampel	Massa Sebelum Terkena Temperatur Tinggi (kg)	Massa Setelah Terkena Temperatur Tinggi (kg)	Penurunan Berat (Kg)	Presentase Penurunan Berat (%)
-	Suhu Kamar (Tidak Dibakar)	23	36.8	-	-	-
		18	37.5	-	-	-
		5	38.5	-	-	-
Disiram	200 ⁰ C	12	37.5	37	0.5	1.333
		24	40.6	37.05	3.55	8.744
		2	40.9	40.5	0.4	0.978
	400 ⁰ C	19	38.5	37	1.5	3.896
		27	40	38.4	1.6	4.000
		8	41.8	40.5	1.3	3.110
	600 ⁰ C	1	39.1	38.7	0.4	1.023
		21	37.65	36.55	1.1	2.922
		13	38.5	37.7	0.8	2.078
Biasa	200 ⁰ C	28	40.4	40.1	0.3	0.743
		26	37.6	37.45	0.15	0.399
		6	40	39.55	0.45	1.125
	400 ⁰ C	20	37.5	34.85	2.65	7.067
		29	41.2	39.45	1.75	4.248
		15	41.1	39.7	1.4	3.406
	600 ⁰ C	14	41	36.6	4.4	10.732
		16	38.8	33.5	5.3	13.660
		10	42.3	38.8	3.5	8.274



Gambar 4.3. Perbandingan Penurunan Berat Beton Tanpa Tulangan Akibat Temperatur Tinggi

4.5 Pengujian Lebar Retak Balok Beton

Benda uji berupa balok dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 75 cm. Pengujian terhadap balok beton dilakukan pada umur beton 28 hari. Pada pengujian lebar retak terbagi menjadi pengujian lebar retak balok beton bertulang dan pengujian balok beton tanpa tulangan. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian lebar retak 1 setrip sebelum runtuh yang bertujuan untuk mendapatkan data berupa besarnya lebar retak yang terjadi pada balok beton dengan pembebanan sebelum runtuh.

4.5.1 Pengujian Lebar Retak Balok Beton bertulang

Pengamatan lebar retak menggunakan alat *Crack Detector Microscope* yang dilakukan pada balok uji setiap penambahan beban LCD sebesar 1 setrip dan 5 setrip. Setiap penambahan beban LCD sebesar 1 setrip yaitu setiap penambahan beban sebesar 132 kg untuk retak yang terbesar pada kondisi beban tersebut. Dan untuk setiap penambahan beban LCD sebesar 5 setrip yaitu setiap penambahan beban sebesar 660 kg untuk keseluruhan lebar retak yang terjadi. Pengamatan lebar retak dilakukan dari awal terjadi retak sampai balok runtuh, sehingga diperoleh lebar retak 1 setrip sebelum runtuh. Pada baja pendistribusian beban diantara proving ring dan benda uji memiliki berat sebesar 24,75 kg. Sehingga pembacaan LCD pada setrip ke-0 sebesar 24,75 kg. Dan untuk pembacaan LCD pada setrip ke-1 sebesar 156,75 kg

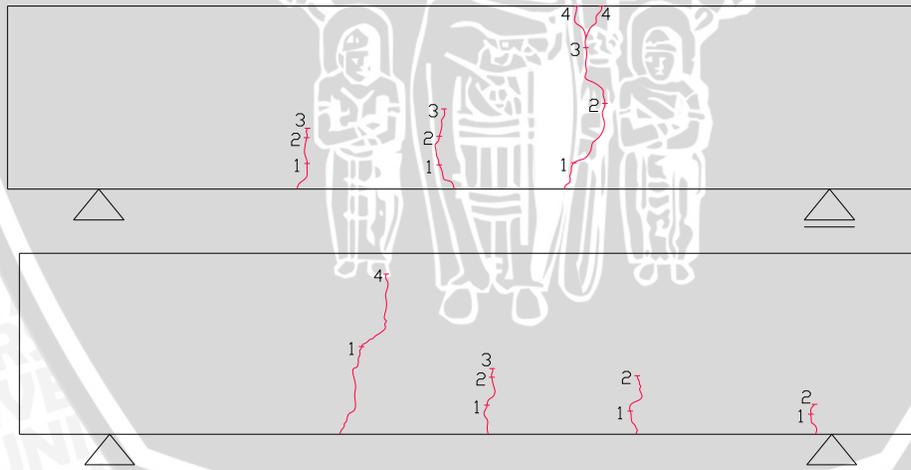
4.5.1.1 Pengamatan Lebar Retak Tiap 1 Setrip

Pengamatan lebar retak tiap 1 setrip dilakukan guna mengetahui lebar retak terbesar pada pembebanan setiap 132 kg.. Untuk penomoran retak diberikan setiap kali retak terjadi, baik retak tersebut merupakan retak baru yang muncul maupun retak yang merupakan retak lanjutan dari retak yang sudah muncul pada pembebanan sebelumnya. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perkembangan terjadinya retak pada balok uji. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada data dari salah satu balok uji pada suhu ruangan, sebagai berikut:

Tabel 4.10 Data Beban,Lendutan dan Nomor Retak Beton Uji no.42

No	BEBAN (Kg)	Balok no.42			No	BEBAN (Kg)	Balok no.42		
		Lendutan (mm)	Retak				Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blkg				depan	blkg
1	156.75	13	-	-	21	2796.75	207	-	-
2	288.75	49	-	-	22	2928.75	222	-	-
3	420.75	59	-	-	23	3060.75	230	-	-
4	552.75	72	-	-	24	3192.75	242	-	-
5	684.75	82	-	-	25	3324.75	252	-	-
6	816.75	95	-	-	26	3456.75	259	-	-
7	948.75	104	-	-	27	3588.75	267	1	1
8	1080.75	112	-	-	28	3720.75	283		
9	1212.75	119	-	-	29	3852.75	285		
10	1344.75	127	-	-	30	3984.75	287		
11	1476.75	136	-	-	31	4116.75	289	2	2
12	1608.75	146	-	-	32	4248.75	305		
13	1740.75	156	-	-	33	4380.75	315		
14	1872.75	167	-	-	34	4512.75	319		
15	2004.75	173	-	-	35	4644.75	321		
16	2136.75	174	-	-	36	4776.75	325		
17	2268.75	182	-	-	37	4908.75	328	3	3
18	2400.75	187	-	-	38	5040.75	331	4	4
19	2532.75	197	-	-	39	5172.75	Runtuh		
20	2664.75	205	-	-					

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.4 Gambar Retak Pada Sisi Depan dan belakang balok no.42

Sedangkan lebar retak yang diukur adalah lebar retak yang terjadi pada sisi-sisi balok uji. Dimana pada penelitian ini sisi balok uji yang ditinjau yaitu sisi depan dan belakang (sisi samping dari balok uji).

Pengukuran lebar retak seperti tersebut dibawah dilakukan pada kedua sisi balok dan selanjutnya pada setiap penambahan beban sebesar 132 kg mulai 24,75 kg pada titik yang sama dilakukan pengukuran lebar retak sampai balok runtuh. Hal tersebut berdasarkan asumsi bahwa retak tersebut merupakan retak yang paling besar dibandingkan retak pada titik yang lain pada balok uji yang akan terjadi kemudian.

Tabel 4.11 Data Lebar Retak 1 Setrip Pada Beton Uji no.42

Beban LCD	Beban (P)	suhu ruangan	
		42	
		depan	blkng
1	156.75	0	0
2	288.75	0	0
3	420.75	0	0
4	552.75	0	0
5	684.75	0	0
6	816.75	0	0
7	948.75	0	0
8	1080.75	0	0
9	1212.75	0	0
10	1344.75	0	0
11	1476.75	0	0
12	1608.75	0	0
13	1740.75	0	0
14	1872.75	0	0
15	2004.75	0	0
16	2136.75	0	0
17	2268.75	0	0
18	2400.75	0	0
19	2532.75	0	0
20	2664.75	0	0
21	2796.75	0	0
22	2928.75	0	0
23	3060.75	0	0
24	3192.75	0	0
25	3324.75	0	0
26	3456.75	0	0
27	3588.75	0.04	0.08
28	3720.75	0.08	0.08



29	3852.75	0.08	0.09
30	3984.75	0.09	0.09
31	4116.75	0.09	0.09
32	4248.75	0.13	0.1
33	4380.75	0.15	0.1
34	4512.75	0.17	0.11
35	4644.75	0.17	0.12
36	4776.75	0.18	0.13
37	4908.75	0.2	0.16
38	5040.75	0.26	0.20
39	5172.75	1	0.97

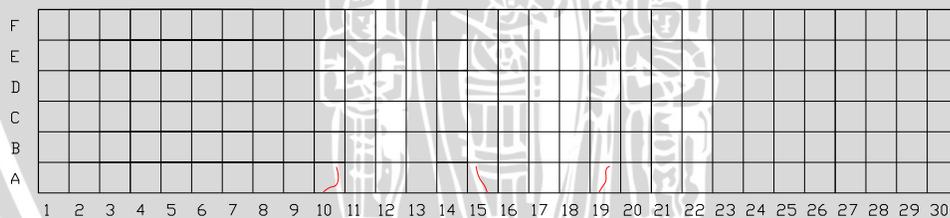
Sumber : Hasil Penelitian

4.5.1.2 Pengamatan Lebar Retak Tiap 5 Setrip

Untuk pengukuran lebar retak 5 setrip dilakukan guna mengetahui keseluruhan lebar retak yang terjadi pada pembebanan setiap 660 kg mulai awal terjadi retak. Sebagai contoh pengambilan data, berikut ini merupakan data lebar retak pada balok uji no.42 pada suhu ruangan.

Retak pada sisi depan

1. Pada kondisi pembebanan 3588,75 kg terjadi retak awal

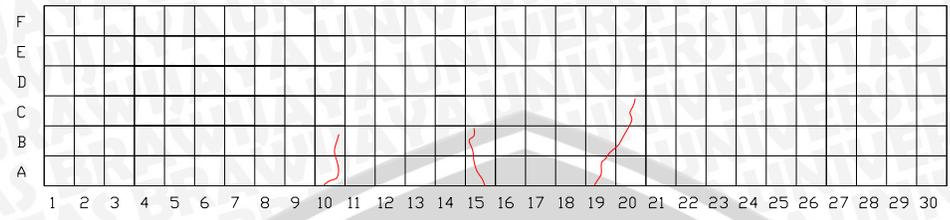


Gambar 4.5 Gambar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 3588,75 kg

Tabel 4.12 Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 3588,75 kg

Zona	Lebar retak (mm)
A ₁₀	0,04
A ₁₅	0,02
A ₁₉	0,04

2. Pada kondisi pembebanan 4248,75 kg terjadi pelebaran retak dan penambahan retak

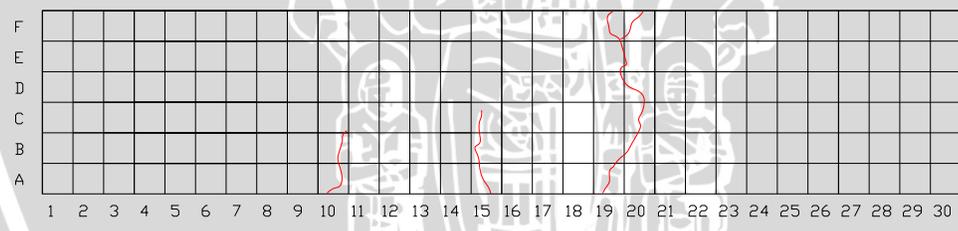


Gambar 4.6 Gambar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4248,75 kg

Tabel 4.13 Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4248,75 kg

Zona	Lebar retak (mm)
A ₁₀	0.06
B ₁₀	0.04
A ₁₅	0.10
B ₁₅	0.06
A ₁₉	0.13
B ₂₀	0.05
C ₂₀	0.02

3. Pada kondisi pembebanan 4908,75 kg terjadi pelebaran retak dan penambahan retak



Gambar 4.7 Gambar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4908,75 kg

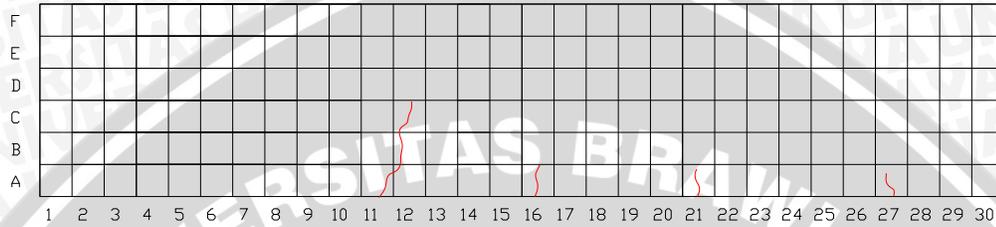
Tabel 4.14 Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Depan Pada Pembebanan 4908,75 kg

Zona	Lebar retak (mm)
A ₁₀	0,06
B ₁₀	0,08
A ₁₅	0,20
B ₁₅	0,18
C ₁₅	0,04
A ₁₉	0.20
B ₁₉	0,18
B ₂₀	0,18
C ₂₀	0,14
D ₂₀	0,12

E ₁₉	0,08
F ₁₉	0,03
F ₂₀	0,02

Retak pada sisi belakang

1. Pada kondisi pembebanan 3588,75 kg terjadi retak awal

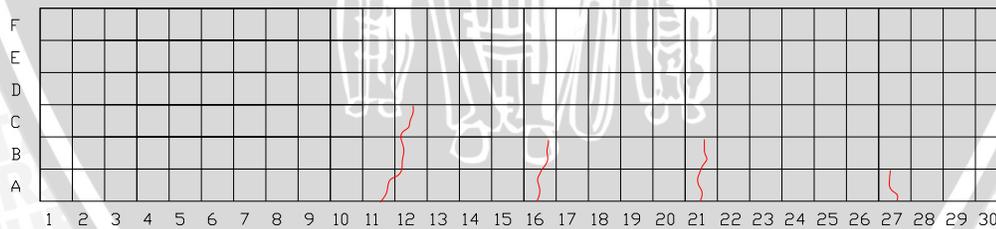


Gambar 4.8 Gambar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 3588,75 kg

Tabel 4.15 Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 3588,75 kg

Zona	Lebar retak (mm)
A ₁₁	0,08
B ₁₂	0,06
C ₁₂	0,02
A ₁₆	0,02
A ₂₁	0,06
A ₂₇	0,02

2. Pada kondisi pembebanan 4248,75 kg terjadi pelebaran retak dan penambahan retak

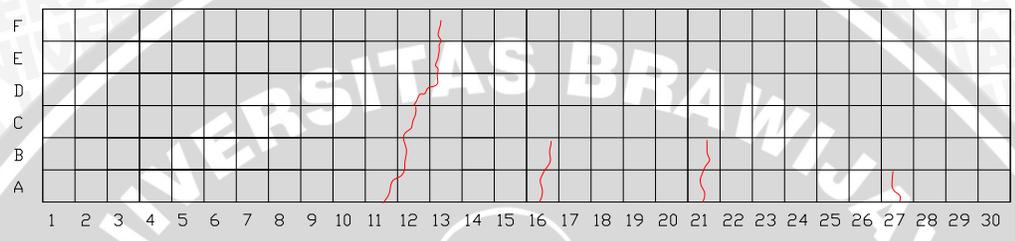


Gambar 4.9 Gambar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4248,75 kg

Tabel 4.16 Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4248,75 kg

Zona	Lebar retak (mm)
A ₁₁	0,10
B ₁₂	0,06
C ₁₂	0,04
A ₁₆	0,04
A ₂₁	0,10
A ₂₇	0,02

3. Pada kondisi pembebanan 4908,75kg terjadi pelebaran retak dan penambahan retak



Gambar 4.10 Gambar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4908,75 kg

Tabel 4.17 Data Lebar Retak 5 Setrip Sisi Belakang Pada Pembebanan 4908,75 kg

Zona	Lebar retak (mm)
A ₁₁	0,16
B ₁₂	0,10
C ₁₂	0,08
D ₁₂	0,08
E ₁₃	0,04
F ₁₃	0,02
A ₁₆	0,05
B ₁₆	0,02
A ₂₁	0,13
B ₂₁	0,08
A ₂₇	0,04

Sumber : Hasil Penelitian

4.5.2 Pengujian Lebar Retak Balok Beton Tanpa Tulangan

Pada pengujian lebar retak balok tanpa tulangan, benda uji hanya kuat terhadap tekan dan lemah terhadap tarik. Jika dilihat pada balok uji dimana keruntuhan yang terjadi pada balok disebabkan oleh runtuh lentur yang getas dan terjadi secara tiba-tiba. Retak vertikal yang arahnya menuju pada titik beban tersebut merupakan ciri-ciri dari keruntuhan akibat lentur. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11



Gambar 4.11 Gambar Retak Pada Beton Tanpa Tulangan

4.5.3 Pengolahan Data Lebar Retak

Untuk mempermudah dalam pengolahan data, pengukuran lebar retak antara variabel treatment pendinginan dan variabel suhu pembakaran kami paparkan seperti tabel di bawah ini :

Tabel 4.18 Lebar Retak Terbesar pada Tiap Balok Uji dengan Pembakaran

BEBAN LCD	BALOK PERLAKUAN	Lebar Retak (mm) dengan Pembakaran								
		Suhu 200°C			Suhu 400°C			Suhu 600°C		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.08	0
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0
2	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.08	0
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0
3	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.09	0
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0
4	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.09	0
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0
5	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.1	0
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0.04
BEBAN	BALOK	Lebar Retak (mm) dengan Pembakaran								

LCD	PERLAKUAN	Suhu 200°C			Suhu 400°C			Suhu 600°C		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
6	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.1	0
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0.05
7	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.11	0.04
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0.07
8	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.11	0.05
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0.08
9	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.11	0.14
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0.1
10	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.12	0.22
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0.04	0.1
11	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.12	0.22
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0.05	0.12
12	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.12	0.23
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0.06	0.14
13	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.12	0.24
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0.06	0.15
14	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.13	0.25
	Disiram	0	0	0	0	0	0	0.16	0.07	0.16
15	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.13	0.26
	Disiram	0.015	0	0	0	0	0	0.16	0.08	0.18
16	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.14	0.48
	Disiram	0.015	0	0	0	0	0	0.16	0.08	0.2
17	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.15	0.82
	Disiram	0.02	0	0	0	0	0	0.16	0.08	0.64
18	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0	0.26	0.17	
	Disiram	0.02	0	0	0.04	0	0	0.16	0.08	
19	Tidak Disiram	0	0	0	0	0	0.02	0.27	0.18	
	Disiram	0.025	0	0	0.06	0	0	0.16	0.08	
20	Tidak Disiram	0.08	0	0	0.06	0	0.04	0.3	0.2	
	Disiram	0.03	0	0.07	0.08	0.04	0.1	0.16	0.08	

BEBAN LCD	BALOK PERLAKUAN	Lebar Retak (mm) dengan Pembakaran								
		Suhu 200°C			Suhu 400°C			Suhu 600°C		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
21	Tidak Disiram	0.08	0	0.06	0.075	0	0.06	0.97	0.2	
	Disiram	0.04	0	0.09	0.08	0.045	0.12	0.17	0.1	
22	Tidak Disiram	0.08	0	0.07	0.09	0	0.06		0.2	
	Disiram	0.05	0	0.11	0.085	0.05	0.13	0.18	0.11	
23	Tidak Disiram	0.08	0	0.08	0.11	0.04	0.07		0.2	
	Disiram	0.07	0.04	0.13	0.1	0.05	0.14	0.18	0.12	
24	Tidak Disiram	0.09	0	0.09	0.13	0.06	0.09		0.2	
	Disiram	0.09	0.05	0.14	0.12	0.06	0.15	0.19	0.14	
25	Tidak Disiram	0.1	0.06	0.1	0.16	0.08	0.1		0.2	
	Disiram	0.12	0.06	0.16	0.14	0.06	0.16	0.2	0.16	
26	Tidak Disiram	0.13	0.06	0.14	0.16	0.08	0.15		0.2	
	Disiram	0.12	0.07	0.17	0.16	0.07	0.16	0.21	0.17	
27	Tidak Disiram	0.16	0.08	0.15	0.16	0.09	0.18		0.89	
	Disiram	0.13	0.08	0.19	0.19	0.08	0.16	0.22	0.19	
28	Tidak Disiram	0.19	0.13	0.16	0.16	0.09	0.2			
	Disiram	0.14	0.1	0.2	0.24	0.085	0.16	0.25	0.25	
29	Tidak Disiram	0.21	0.14	0.17	0.16	0.1	0.24			
	Disiram	0.15	0.11	0.21	1	0.09	0.16	1	0.3	
30	Tidak Disiram	0.23	0.16	0.18	0.16	0.1	0.26			
	Disiram	0.16	0.12	0.22		0.1	0.16		0.4	
31	Tidak Disiram	0.42	0.18	0.21	0.16	0.16	0.28			
	Disiram	0.52	0.12	0.23		0.12	0.17		0.96	
32	Tidak Disiram		0.19	0.23	0.16	0.21	0.81			
	Disiram		0.13	0.86		0.13	0.72			
33	Tidak Disiram		0.2	0.23	0.17	0.24				
	Disiram		0.14			0.18				
34	Tidak Disiram		0.7	0.93	0.19	0.29				
	Disiram		0.42			0.66				
35	Tidak Disiram				0.77	0.38				
	Disiram									

BEBAN LCD	BALOK PERLAKUAN	Lebar Retak (mm) dengan Pembakaran								
		Suhu 200°C			Suhu 400°C			Suhu 600°C		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
36	Tidak Disiram					0.97				
	Disiram									

Sumber : Hasil Penelitian

Dari tabel 4.15 diatas dapat diketahui bahwa seluruh benda uji mengalami retak pada pembebanan yang berbeda. Sehingga data lebar retak yang digunakan untuk pengujian hipotesis yaitu data lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 setrip sebelum runtuh. Berikut ini merupakan tabel data lebar retak yang digunakan untuk pengujian hipotesis :

Tabel 4.19 Lebar Retak Maksimum pada Balok Beton Kondisi 1 Strip Sebelum Runtuh

BALOK PERLAKUAN	LEBAR RETAK (mm)								
	Suhu 200°C			Suhu 400°C			Suhu 600°C		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Tidak Disiram	0.23	0.2	0.23	0.19	0.38	0.28	0.3	0.2	0.48
Disiram	0.16	0.14	0.23	0.24	0.18	0.17	0.25	0.4	0.2

4.8 Pengujian Hipotesis

4.8.1 Uji kenormalan data

Pengujian dilakukan dengan memasukan data dari hasil percobaan yaitu data dari hasil pengujian lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 strip sebelum runtuh pada variasi perlakuan pendinginan yaitu disiram dan tidak disiram pada variasi suhu 200°C, 400°C dan 600°C harus terdistribusi normal. Perhitungan uji kenormalan data menggunakan cara uji kenormalan *Kolmogorov-smirnov Test*, dimana dalam proses perhitungan memakai bantuan software SPSS. Uji *Kolmogorov-smirnov Test* adalah suatu teknik analisis untuk menguji apakah suatu kumpulan data mengikuti distribusi normal dengan rata-rata μ dan varian σ^2 . Hipotesis yang diajukan adalah H_0 bila data berdistribusi normal dan H_a bila data tidak berdistribusi normal. Proses perhitungan uji kenormalan *Kolmogorov-smirnov Test* untuk mendapatkan nilai signifikasi harus lebih

besar 0,05. Penggunaan signifikasi untuk mengetahui kenormalan data. Hasil perhitungannya seperti pada Tabel 4.15.

Tabel 4.20 Hasil Uji Kenormalan *Kolmogorov-smirnov Test*

Pengujian	Signifikasi	Resiko Kesalahan (α)	Keterangan
Lebar retak	0,391	0,05	Terima H_0

Sumber : Hasil Perhitungan

Kesimpulan yang didapat adalah bahwa dari semua data lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 strip sebelum runtuh, hipotesis yang ada ternyata menerima H_0 . Hal ini berarti data dari hasil pengujian lebar retak beton dapat didekati dengan distribusi normal. Selanjutnya dapat dilakukan pengujian hipotesis dengan Analisis Varian (uji F).

4.8.2 Uji Homogenitas

Uji homogenitas digunakan untuk mengetahui bahwa dua atau lebih kelompok data sampel berasal dari populasi yang memiliki variasi yang sama. Proses pengujianya menggunakan program SPSS. Interpretasi dilakukan dengan memilih salah satu statistik yaitu stastatik yang didasarkan pada rata-rata (*Based on Mean*). Hipotesis yang diajukan adalah H_0 bila variasi data pada tiap kelompok sama (homogen) dan H_1 bila variasi data pada tiap kelompok tidak sama (tidak homogen). Proses perhitungan uji homogenitas untuk mendapatkan nilai signifikasi harus lebih besar 0,05. Hasil perhitungannya seperti pada Tabel 4.16.

Tabel 4.21 Hasil Uji Homogenitas data

Pengujian	Signifikasi	Resiko Kesalahan (α)	Keterangan
Lebar retak	0.104	0,05	Terima H_0

Sumber : Hasil Perhitungan

Kesimpulan yang didapat adalah bahwa dari semua data lebar retak maksimum pada balok beton kondisi 1 strip sebelum runtuh, hipotesis yang ada ternyata pengujian dengan statistik *Based on Mean* diperoleh signifikasi 0.104 jauh melebihi 0.05. Dengan demikian data penelitian diatas homogen. Selanjutnya dapat dilakukan pengujian hipotesis dengan Analisis Varian (uji F).

4.8.3 Analisis varian

Pengujian hipotesis yang dilakukan adalah analisis varian dua arah, dengan cara uji F dimana kriteria pengujian dengan resiko kesalahan 5% ($\alpha = 0,05$), dan perhitungannya dilakukan secara manual. Dengan menggunakan perbedaan perlakuan treatment pendinginan yaitu tidak disiram dan disiram (X) serta perbedaan nilai suhu yaitu suhu 200°C, 400°C dan 600°C (Y) dan pengaruh interaksi keduanya terhadap retak maksimum pada balok beton kondisi 1 setrip sebelum runtuh. Analisis varian dua arah dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh suhu pembakaran dan treatment pendinginan terhadap lebar retak yang terjadi pada balok beton. Yang mana variasi treatment pendinginan dan suhu pembakaran merupakan variable bebas sedangkan lebar retak yang terjadi merupakan variable terikat atau tidak bebas.

Pengujian hipotesis merupakan salah satu bagian terpenting dalam teknik pengambilan keputusan, untuk mengetahui apakah suatu pernyataan atau hipotesis suatu masalah diterima atau ditolak.

Keputusan diambil dengan membandingkan nilai signifikansi kedua variabel bebas dengan taraf signifikansi atau $\alpha = 5\%$, dengan pedoman :

- Nilai F hitung $>$ F table, maka H_0 ditolak
- Nilai F hitung $<$ F table, maka H_0 diterima

Dimana :

- H_0 = Hipotesis yang menyatakan bahwa tidak terdapat pengaruh dari variasi cara treatment pendinginan dan suhu atau interaksi keduanya terhadap lebar retak beton.
- H_1 = Hipotesis yang menyatakan bahwa terdapat pengaruh dari variasi cara treatment pendinginan dan suhu atau interaksi keduanya terhadap lebar retak beton.

Pengaruh cara pendinginan dan suhu serta interaksi keduanya terhadap karakteristik lebar retak dapat dilihat dari nilai signifikansi atau dengan nilai F. Jika nilai signifikansi $<$ 0,05 maka tolak H_0 dan terima H_1 , atau dengan nilai F_{hitung} dan F_{tabel} . Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka tolak H_0 dan terima H_1 . Berikut ini adalah hasil analisa terhadap uji F pada masing-masing nilai karakteristik:

Pengaruh Perlakuan Pendinginan dan temperatur Terhadap Lebar Retak.

Tabel 4.22 Hasil Analisis Varian Terhadap Lebar Retak

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.052 ^a	5	.010	1.408	.290
Intercept	1.105	1	1.105	150.808	.000
Perilaku_Pendinginan	.015	1	.015	2.050	.178
Suhu	.035	2	.017	2.366	.136
Perilaku_Pendinginan * Suhu	.002	2	.001	.128	.881
Error	.088	12	.007		
Total	1.245	18			
Corrected Total	.140	17			

Berdasarkan tabel 4.17 diatas dapat dikatakan bahwa :

1. Tabel *Between Subjects Effects* merupakan table utama yang membedakan hasil hipotesis. Dari table tersebut , diketahui nilai p-value untuk kategori perilaku pendinginan sebesar 0.178 (> 0.05), maka kesimpulannya tidak ada perbedaan variasi yang signifikan terhadap perilaku pendinginan antara pendinginan tidak disiram dan pendinginan disiram.
2. Dari tabel *Between Subjects Effects* tersebut , diketahui nilai p-value untuk kategori suhu sebesar 0.136 (> 0.05), maka kesimpulannya tidak ada perbedaan variasi yang signifikan terhadap suhu 200°C, 400°C dan 600°C
3. Untuk melihat apakah ada perbedaan perilaku pendinginan dan suhu, maka kita dapat melihat tabel *Between Subjects Effects*, diketahui nilai p-value untuk Perilaku_Pendinginan * Suhu sebesar 0.881 (> 0.05), maka kesimpulannya tidak ada perbedaan yang signifikan terhadap perilaku pendinginan dan suhu.

4.9 Pembahasan

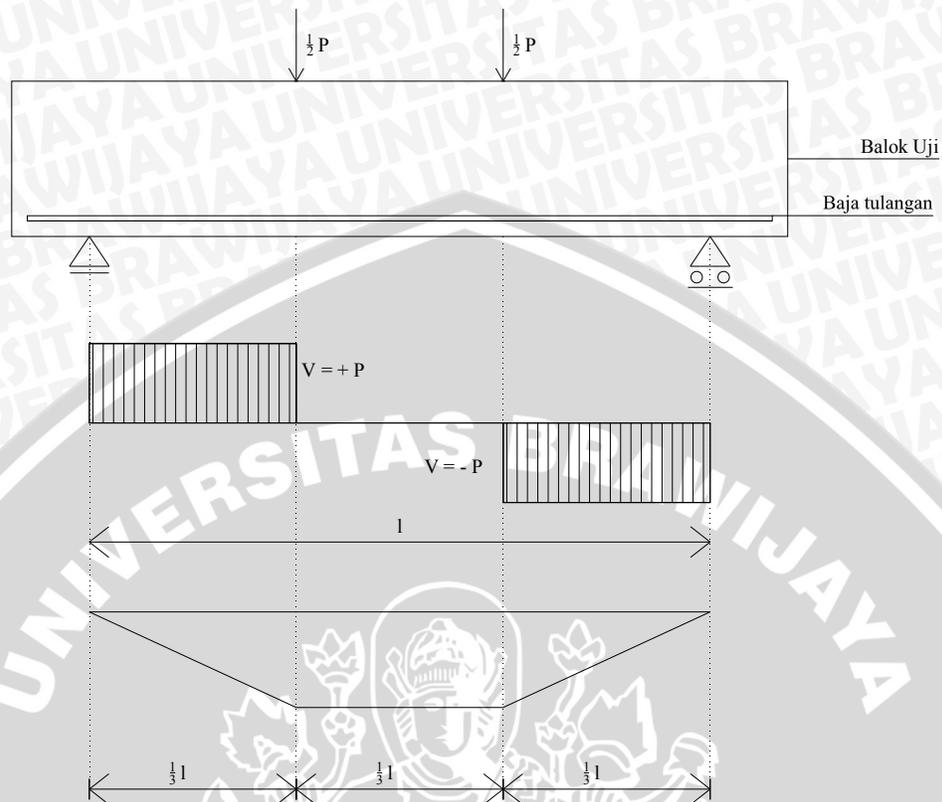
4.7.1 Pembahasan Balok Beton Bertulang

4.7.1.1 Retak yang Terjadi pada Balok Beton Bertulang

Pada hasil pengamatan retak yang terjadi pada balok beton bertulang adalah bahwa selama pembebanan diberikan, pada balok telah terjadi retak lentur atau *flexure crack* dengan arah retak hampir tegak lurus dengan sumbu balok. Kemudian juga terjadi retak geser lentur atau *flexure shear crack* yang merupakan retak miring sebagai lanjutan dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya.

Jika dilihat dari keseluruhan balok uji, retak mulai terjadi pada awal-awal pembebanan pada tengah bentang yaitu bentang yang memikul momen lebih besar (interval beban terpusat). Retak berupa retak halus vertikal yang diakibatkan oleh lentur, dan selama pembebanan ditambah secara berangsur-angsur retak bergerak ke arah garis netral. Kemudian mendekati beban runtuh, terjadi retak tarik diagonal dari arah tumpuan menuju beban terpusat. Seiring pertambahan beban, retak yang terjadi terus melebar dan memanjang hingga mencapai serat atas dan bawah balok dan tanpa didahului tanda-tanda, terjadilah runtuh tarik diagonal yang getas dan tiba-tiba dari arah beban terpusat menuju ke tumpuan. Jika diperhatikan pada bentang tersebut (bentang antara beban terpusat dan tumpuan) merupakan bentang yang memikul geser dan lentur secara bersamaan sedangkan bentang tengah hanya memikul lentur saja karena gaya geser pada bentang tersebut sama dengan nol. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11.

Pada perencanaan balok telah direncanakan bahwa balok akan runtuh karena kekuatan gesernya telah mencapai batas sebelum kuat lenturnya. Hal tersebut dapat dilihat pada balok uji dimana keruntuhan yang terjadi pada balok disebabkan oleh runtuh tarik diagonal yang getas dan terjadi secara tiba-tiba. Keruntuhan secara tiba-tiba dan berbentuk diagonal tersebut merupakan ciri-ciri dari keruntuhan akibat geser.

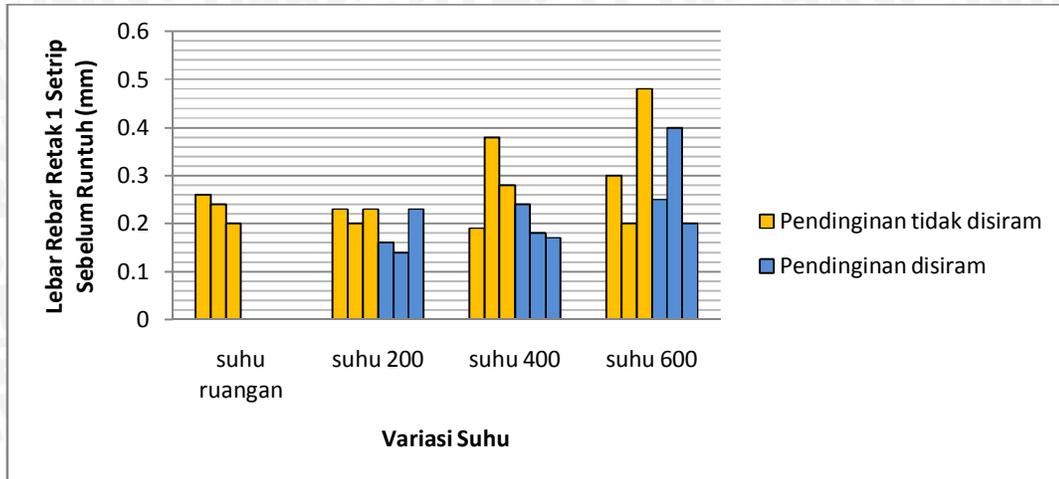


Gambar 4.12 Diagram Momen Lintang Pada Balok Beton Bertulang

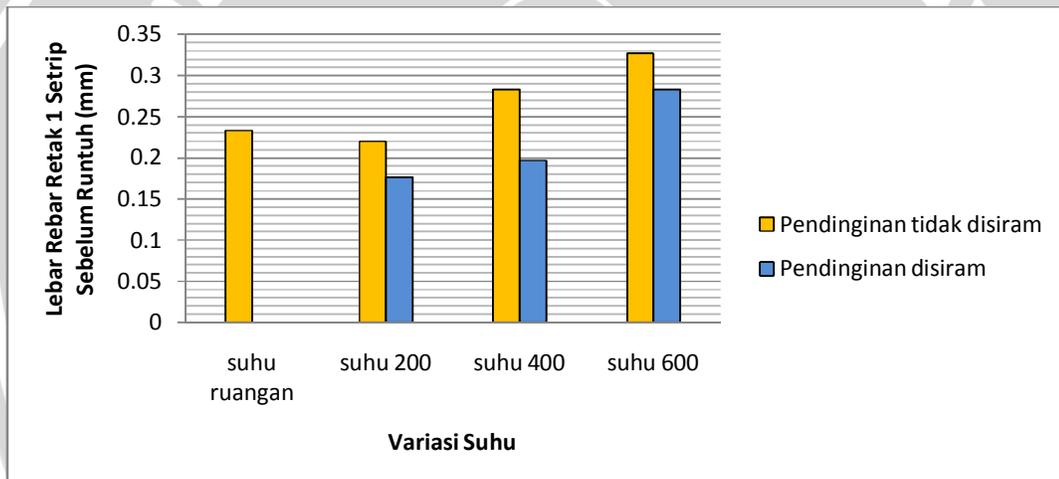
4.7.1.2 Pembahasan Mengenai Lebar Retak pada Balok Beton Bertulang

Berdasarkan gambar 4.11 diatas diketahui penampang yang memikul beban paling besar adalah penampang pada titik dimana beban terpusat berada, karena pada titik tersebut penampang memikul momen dan gaya geser pada saat yang bersamaan. Sehingga dapat diasumsikan pada titik tersebut terjadi retak terlebih dahulu, dan kemungkinan besar lebar retak pada titik tersebut merupakan lebar retak yang terbesar.

Pada kenyataanya retak yang terjadi pada balok uji, pertama kali muncul pada bentang diantara dua beban terpusat. Hal itu menjelaskan bahwa retak yang pertama kali muncul merupakan retak akibat lentur. Tapi pada sebagian besar balok uji, retak yang pertama kali muncul berada pada titik beban pusat berada dan merupakan lebar retak terbesar. Berikut ini grafik lebar retak terbesar pada lebar retak 1 setrip sebelum runtuh.



Gambar 4.13 Gambar Hubungan Antara Lebar Retak dengan Variasi Suhu dan Variasi Pendinginan



Gambar 4.14 Gambar Hubungan Antara Lebar Retak Rata-rata dengan Variasi Suhu dan Variasi Pendinginan

4.7.1.3 Pembahasan Perbandingan Lebar Retak pada Balok Beton Bertulang dengan Variasi Suhu

Berdasarkan gambar 4.14 diatas diketahui hasil pengujian pada balok uji dengan variasi suhu (200°C, 400°C dan 600°C) menunjukkan lebar retak terbesar yang terjadi pada pembakaran balok beton pada suhu 600°C. Akan tetapi pada suhu 200°C lebar retak yang terjadi lebih kecil dari pada lebar retak pada suhu ruangan, hal ini sesuai dengan teori yang ada bahwa pada suhu pemanasan 200 °C bukan terjadi penurunan kekuatan tekan,namun justru terjadi penguatan akibat dari fenomena perawatan yang dipercepat.

Pada perbandingan lebar retak balok beton bertulang dengan variasi suhu secara aktual dapat dilihat perbedaannya pada gambar 4.14. Akan tetapi secara statistik diperoleh tidak ada perbedaan variasi yang signifikan terhadap suhu 200°C, 400°C dan 600°C sesuai pada tabel 4.22. Hal ini dikarenakan kurangnya jumlah variasi suhu yang diperlakukan pada benda uji, sehingga diharapkan agar pada penelitian selanjutnya memperbanyak jumlah variasi suhu pembakaran.

4.7.1.4 Pembahasan Perbandingan Lebar Retak pada Balok Beton Bertulang dengan Variasi Pendinginan

Hasil pengujian pada balok uji menunjukkan lebar retak terbesar yang terjadi pada balok beton dengan pendinginan tidak disiram lebih besar dibandingkan dengan balok beton dengan pendinginan disiram. Hal tersebut dikarenakan retak yang semakin lebar mengindikasikan kerusakan beton yang semakin parah. Sehingga pada balok yang tidak mengalami penyiraman kerusakan yang terjadi lebih parah dari balok yang tidak mengalami penyiraman. Hal ini sesuai dengan teori yang ada bahwa tingkat recovery kekuatan beton setelah dilakukan treatment penyiraman dengan air mampu mendekati 100% dari kekuatan awal beton sebelum terbakar.

Pada perbandingan lebar retak balok beton bertulang dengan variasi pendinginan secara aktual dapat dilihat perbedaannya pada gambar 4.14. Akan tetapi secara statistik diperoleh tidak ada perbedaan variasi yang signifikan terhadap perilaku pendinginan antara pendinginan tidak disiram dan pendinginan disiram sesuai pada tabel 4.22.

4.7.2 Pembahasan Balok Beton Tanpa Tulangan

Pada pengujian lebar retak balok tanpa tulangan, pada kenyataannya lebar retak yang terjadi pada balok uji, terjadi secara tiba-tiba. Dari benda uji seperti pada gambar 4.11 waktu yang dicapai balok beton tanpa tulangan dari awal terjadi retak sampai balok mengalami runtuh kurang dari satu detik. Sehingga pengamatan lebar retak pada balok tanpa tulangan tidak dapat dilakukan. Tetapi retak yang terjadi pada beton tanpa tulangan dapat kami lampirkan.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dan telah diuraikan pada pembahasan bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Rata-rata lebar retak balok beton pada suhu 200°C, 400°C dan 600°C dengan treatment pendinginan normal adalah sebagai berikut : pada suhu 200°C sebesar 0.22 mm, suhu 400°C sebesar 0.283 mm, dan suhu 600°C sebesar 0.3267 mm.
2. Rata-rata lebar retak balok beton pada suhu 200°C, 400°C dan 600°C dengan treatment pendinginan disiram adalah sebagai berikut : pada suhu 200°C sebesar 0.1767 mm, suhu 400°C sebesar 0.1967 mm, dan suhu 600°C sebesar 0.283 mm.
3. Perubahan suhu yang semakin tinggi (200°C, 400°C, 600°C) tidak mempengaruhi lebar retak yang terjadi pada balok saat diberi beban.
4. Cara pendinginan beton (pendinginan normal dan pendinginan disiram) dengan waktu pendinginan dan suhu pembakaran beton tidak mempengaruhi lebar retak yang terjadi pada balok saat diberi beban.
5. Treatment pendinginan terhadap beton dengan air mampu meningkatkan tingkat recovery beton sebesar 0,195% pada suhu 200°C; 0,304% pada suhu 400°C dan 0,135 pada suhu 600°C.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh dari penelitian yang sudah dilakukan maka peneliti dapat memberi saran sebagai berikut :

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut yaitu melakukan penambahan variasi suhu pembakaran.
2. Untuk penelitian berikutnya agar dapat lebih teliti dalam perhitungan mix desain dan pengecoran beton.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut yaitu melakukan penambahan pengaruh lebar retak terhadap susut dan rangkai.

DAFTAR PUSTAKA

- Dipohosodo, I. *Struktur Beton Bertulang*. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama. 1999.
- Irmawan, Mudji. Dkk 2002. *Perubahan Perilaku Beton Mutu Normal Pada Temperatur Tinggi Pasca Kebakaran*. Makalah Seminar Nasional, FTSP ITS. Surabaya.
- Mulyono, T. *Teknologi Beton*. Yogyakarta : Andi. 2004.
- Nawy, Edward G. 1998. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Bandung: PT. Refika Aditama.
- Priyosulistyo. *Sifat-Sifat Mekanik Bahan Struktur Terhadap Beban Gempa dan Temperatur Tinggi*. Disampaikan dalam Kursus Singkat Evaluasi Dan Penanganan Struktur Beton Yang Rusak Akibat Kebakaran dan Gempa .Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Yogyakarta, 24-25 Maret 2000.
- Sudarmoko. *Metode Perbaikan dan Cara Pelaksanaan*. Disampaikan dalam Kursus Singkat Evaluasi Dan Penanganan Struktur Beton Yang Rusak Akibat Kebakaran dan Gempa .Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Yogyakarta, 24-25 Maret 2000.
- Triwiyono, A. *Kerusakan Struktur Gedung Pasca Kebakaran*. Disampaikan dalam Kursus Singkat Evaluasi Dan Penanganan Struktur Beton Yang Rusak Akibat Kebakaran dan Gempa .Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Yogyakarta, 24-25 Maret 2000.
- Fintel, Mark. *Buku Pegangan tentang Teknik Beton*. Jakarta. PT. Pradnya Paramita. 1987.
- Mosley, W.H dan Bungle, J.H., *Perencanaan Beton Bertulang*. Jakarta. Erlangga. 1989.
- Jonbi, *Concrete Repair & Maintenance*. Jakarta. Yayasan John Hi-Tech Idetama. 2003.
- Wang, Chu-Kia dan Charles G. Salmon. 1993. *Disain Beton Bertulang*. Jilid 1. Edisi Keempat. Jakarta: Erlangga.



Lampiran 1

Data Beban, Lendutan dan Retak Balok Tiap 1 Setrip

Data Beban,Lendutan dan Nomor Retak Beton pada Suhu Ruangan

LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.42			Balok no.54			Balok no.32		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blknng		depan	blknng		depan	blknng
1	156.75	13			24			13		
2	288.75	49			53			35		
3	420.75	59			64			43		
4	552.75	72			77			58		
5	684.75	82			89			66		
6	816.75	95			103			78		
7	948.75	104			113			88		
8	1080.75	112			122			95		
9	1212.75	119			132			105		
10	1344.75	127			140			115		
11	1476.75	136			150			126		
12	1608.75	146			159			133		
13	1740.75	156			167			141		
14	1872.75	167			176			154		
15	2004.75	173			183			169		
16	2136.75	174			188			175		
17	2268.75	182			194			179		
18	2400.75	187			201			186		
19	2532.75	197			208			192		
20	2664.75	205			215			199		
21	2796.75	207			224			207		
22	2928.75	222			229			212		
23	3060.75	230			237	1	1	219		
24	3192.75	242			247			225		
25	3324.75	252			253	2	2	231	1	1
26	3456.75	259			257			240	2	2
27	3588.75	267	1	1	267	3		246		
28	3720.75	283			273	4	3	253	3	3
29	3852.75	285			Runtuh			260		4
30	3984.75	287						265	4	5
31	4116.75	289	2	2				275	5	6
32	4248.75	305						282		7
33	4380.75	315						290	6	
34	4512.75	319						301	7	8
35	4644.75	321						Runtuh		
36	4776.75	325								
37	4908.75	328	3	3						
38	5040.75	331	4	4						
39	5172.75	Runtuh								

Data Beban,Lendutan dan Nomor Retak Beton pada Suhu 200° Perlakuan tidak disiram

LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.55			Balok no.34			Balok no.51		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blkng		depan	blkng		depan	blkng
1	156.75	12			14			15		
2	288.75	28			24			25		
3	420.75	45			33			35		
4	552.75	48			36			44		
5	684.75	56			43			53		
6	816.75	68			51			63		
7	948.75	75			58			69		
8	1080.75	82			67			78		
9	1212.75	90			72			85		
10	1344.75	97			80			94		
11	1476.75	107			91			101		
12	1608.75	111			98			108		
13	1740.75	121			104			115		
14	1872.75	125			113			122		
15	2004.75	131			123			128		
16	2136.75	139			132			134		
17	2268.75	146			136			139		
18	2400.75	154			138			147		
19	2532.75	165			145			154		
20	2664.75	176	1	1	150			161		
21	2796.75	185			162			168	1	1
22	2928.75	193			167			178		
23	3060.75	197			179			184		
24	3192.75	204			188			194		
25	3324.75	210	2	2	196	1	1	201	2	2
26	3456.75	223			200			224		
27	3588.75	229			208			228		
28	3720.75	233			227			234		
29	3852.75	238			245			240		
30	3984.75	245	3	3	257	2	2	244	3	3
31	4116.75	Runtuh			274			255		
32	4248.75				279			261		
33	4380.75				288	3	3	273	3	4
34	4512.75				Runtuh			Runtuh		

Data Beban,Lendutan dan Nomor Retak Beton pada Suhu 200° Perlakuan disiram

LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.35			Balok no.36			Balok no.44		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blknng		depan	blknng		depan	blknng
1	156.75	10			12			19		
2	288.75	20			30			31		
3	420.75	23			52			42		
4	552.75	32			59			55		
5	684.75	44			70			67		
6	816.75	50			78			80		
7	948.75	58			83			89		
8	1080.75	64			89			97		
9	1212.75	71			90			105		
10	1344.75	76			96			119		
11	1476.75	82			101			177		
12	1608.75	86			105			191		
13	1740.75	91			112			200		
14	1872.75	97			118			210		
15	2004.75	103			122			219		
16	2136.75	108			129			232		
17	2268.75	114			132			240		
18	2400.75	119	1	1	136			249		
19	2532.75	124			142			259		
20	2664.75	128	2	2	146			269	1	1
21	2796.75	132			150			283		
22	2928.75	138			155			291		
23	3060.75	144			165	1	1	301		
24	3192.75	150			173			310		
25	3324.75	154	3	3	178	2	2	317	2	2
26	3456.75	165			188			332		
27	3588.75	173			192			340		
28	3720.75	177			197			347		
29	3852.75	182			201			359		
30	3984.75	185	4	4	206	3	3	370	3	3
31	4116.75	Runtuh			220			382		
32	4248.75				223			Runtuh		
33	4380.75				228	4	4			
34	4512.75				Runtuh					

Data Beban, Lendutan dan Nomor Retak Beton Suhu 400° Perlakuan tidak disiram

LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.48			Balok no.49			Balok no.39		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blkg		depan	blkg		depan	blkg
1	156.75	12			25			12		
2	288.75	24			46			13		
3	420.75	37			52			20		
4	552.75	40			61			21		
5	684.75	47			70			25		
6	816.75	58			80			32		
7	948.75	69			91			42		
8	1080.75	78			101			47		
9	1212.75	85			107			54		
10	1344.75	92			116			61		
11	1476.75	94			122			69		
12	1608.75	107			129			73		
13	1740.75	113			136			84		
14	1872.75	119			141			90		
15	2004.75	127			149			100		
16	2136.75	133			157			108		
17	2268.75	138			161			115		
18	2400.75	145			167			121		
19	2532.75	153			173			132	1	1
20	2664.75	160	1	1	181			142	2	2
21	2796.75	167			187			154		
22	2928.75	173			192			158		
23	3060.75	178			197	1	1	165		
24	3192.75	184		2	204			174		
25	3324.75	195	2		208	2	2	180	3	3
26	3456.75	200			216			191		
27	3588.75	204			223		3	197		
28	3720.75	209			228			201		
29	3852.75	214		3	233			210		
30	3984.75	224	3	4	238		4	213	4	4
31	4116.75	233			242	3		231		
32	4248.75	239	4	5	253	4		Runtuh		
33	4380.75	245			260					
34	4512.75	252	5	6	265		5			
35	4644.75	Runtuh			271	5	6			
36	4776.75				Runtuh					

Data Beban,Lendutan dan Nomor Retak Beton pada Suhu 400° Perlakuan disiram

LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.45			Balok no.43			Balok no.47		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blkng		depan	blkng		depan	blkng
1	156.75	10			5	-		17		
2	288.75	43			18	-		33		
3	420.75	54			25	-		39		
4	552.75	64			29	-		54		
5	684.75	73			33	-		64		
6	816.75	80			45	-		74		
7	948.75	87			53	-		83		
8	1080.75	92			58	-		90		
9	1212.75	100			66	-		98		
10	1344.75	105			73	-		104		
11	1476.75	110			81	-		112		
12	1608.75	117			88	-		117		
13	1740.75	123			92	-		124		
14	1872.75	128			100	-		130		
15	2004.75	134			106	-		135		
16	2136.75	140			113	-		143		
17	2268.75	147			120	-		152		
18	2400.75	153	1	1	126	-		160		
19	2532.75	160			135	-		168		
20	2664.75	167	2	2	140	-	1	177	1	1
21	2796.75	174			152	-		188		
22	2928.75	181			157	-		193		
23	3060.75	192			163	-		199		
24	3192.75	200			168	-		205		
25	3324.75	208	3	3	174	-	2	212	2	2
26	3456.75	216			183	-		227		
27	3588.75	225			188	-		234		
28	3720.75	233	4	4	193	-		240		
29	3852.75	Runtuh			198	-		249		
30	3984.75				202	-	3	254	3	3
31	4116.75				210	-		266		
32	4248.75				216	-		Runtuh		
33	4380.75				230	-	4			
34	4512.75				Runtuh					

Data Beban, Lendutan dan Nomor Retak Beton Suhu 600° Perlakuan tidak disiram

LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.41			Balok no.33			Balok no.31		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blknng		depan	blknng		depan	blknng
1	156.75	12	1	-	13	1	1	23		
2	288.75	22		-	21			33		
3	420.75	39		-	44			46		
4	552.75	41		-	48			58		
5	684.75	51		-	58			72		
6	816.75	60		-	68			88		
7	948.75	70		-	77			103	1	1
8	1080.75	79		-	84			106		
9	1212.75	85		-	94			124		
10	1344.75	95		-	104		2	138		
11	1476.75	100		-	115			150		
12	1608.75	106		-	121			166		
13	1740.75	116		-	130			181		
14	1872.75	122		-	144			197		
15	2004.75	130		-	158	2		204	2	2
16	2136.75	138		-	165			241	3	3
17	2268.75	143		-	173			Runtuh		
18	2400.75	155	2	-	188					
19	2532.75	160		-	195					
20	2664.75	168	3	-	208	3	3			
21	2796.75	Runtuh			219					
22	2928.75				226					
23	3060.75				234					
24	3192.75				242					
25	3324.75				253	4				
26	3456.75				268					
27	3588.75				Runtuh					

Data Beban, Lendutan dan Nomor Retak Beton Suhu 600° Perlakuan disiram

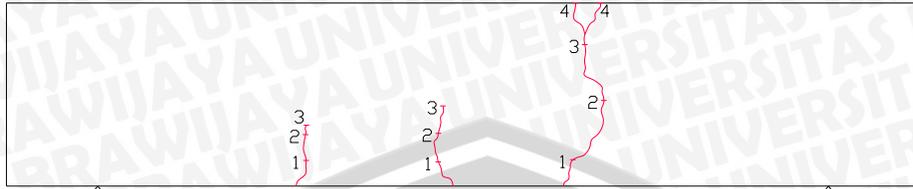
LCD	BEBAN (Kg)	Balok no.30			Balok no.38			Balok no.40		
		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak		Lendutan (mm)	Retak	
			depan	blknng		depan	blknng		depan	blknng
1	156.75	8	1	1	11			54		-
2	288.75	22			25			70		-
3	420.75	36			32			99		-
4	552.75	38			44			114		-
5	684.75	48			57			144	1	-
6	816.75	55			67			174		-
7	948.75	63			78			201		-
8	1080.75	69			88			221		-
9	1212.75	78			98			235		-
10	1344.75	85			107	-	1	255	2	-
11	1476.75	94			121			314		-
12	1608.75	100			127			330		-
13	1740.75	106			135			343		-
14	1872.75	118			145			363		-
15	2004.75	121	2	2	155	1	2	377	3	-
16	2136.75	125			167			381		-
17	2268.75	130			174			Runtuh		
18	2400.75	136			179					
19	2532.75	142			186					
20	2664.75	148	3		192	2	3			
21	2796.75	156			206					
22	2928.75	162			208					
23	3060.75	169			215					
24	3192.75	176			224					
25	3324.75	184	4	3	230	3	4			
26	3456.75	199			239					
27	3588.75	208			244					
28	3720.75	221			254					
29	3852.75	Runtuh			265					
30	3984.75				282	4	5			
31	4116.75				Runtuh					



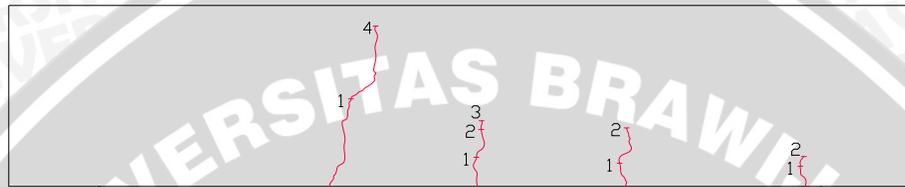
Lampiran 2

Gambar Retak Balok Tiap 1 Setrip

Gambar Lebar retak balok suhu ruangan



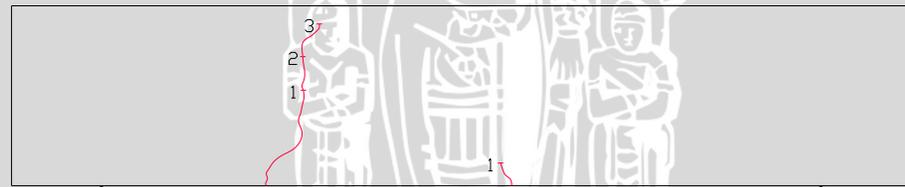
Balok no 42 sisi depan



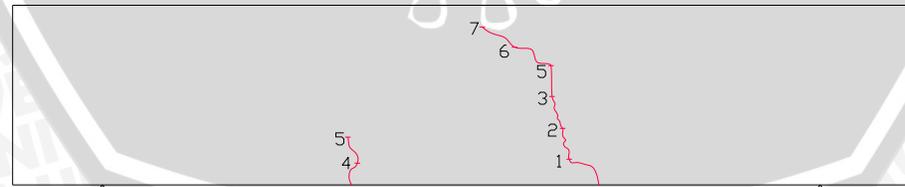
Balok no 42 sisi belakang



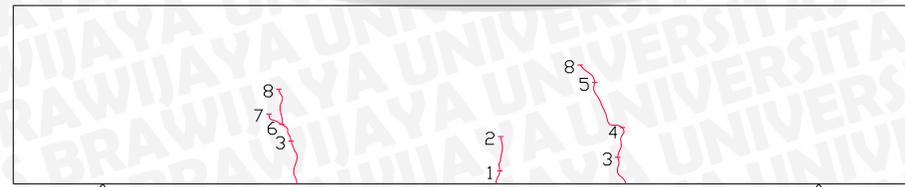
Balok no 54 sisi depan



Balok no 54 sisi belakang



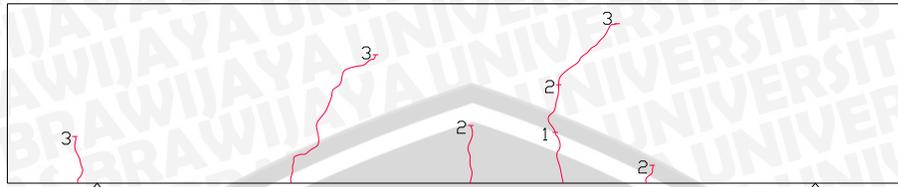
Balok no 32 sisi depan



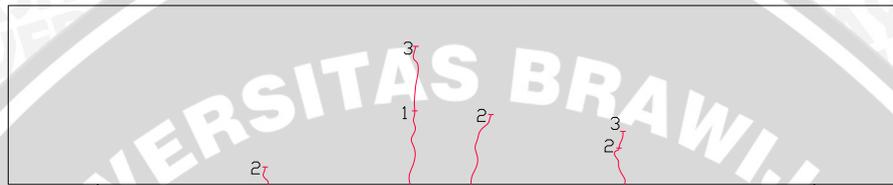
Balok no 32 sisi belakang



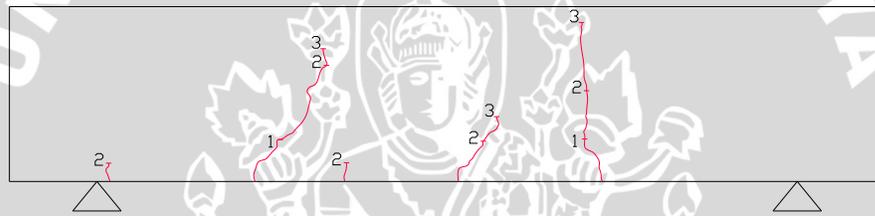
Gambar Lebar retak balok suhu 200° perlakuan tidak disiram



Balok no 55 sisi depan



Balok no 55 sisi belakang



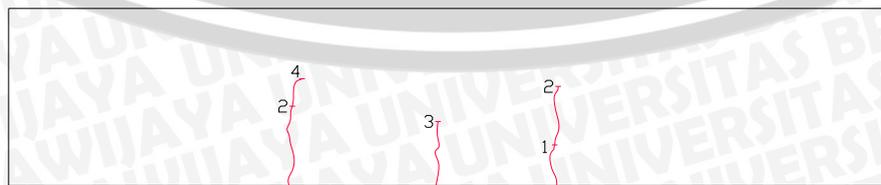
Balok no 34 sisi depan



Balok no 34 sisi belakang



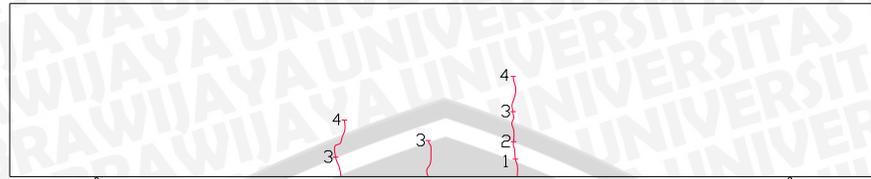
Balok no 51 sisi depan



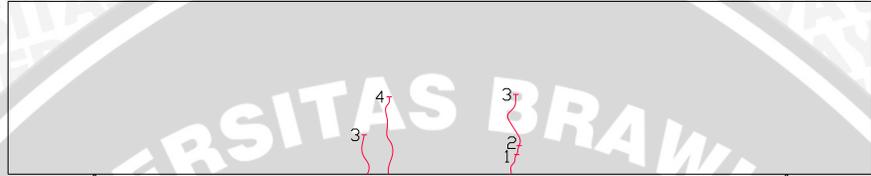
Balok no 51 sisi belakang



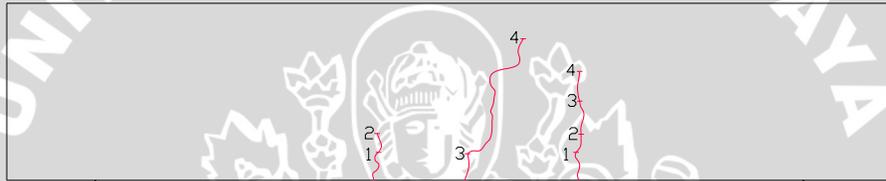
Gambar Lebar retak balok suhu 200° perlakuan disiram



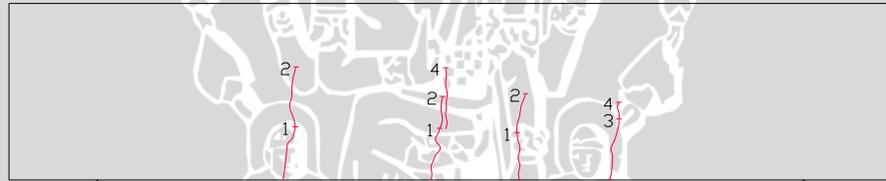
Balok no 35 sisi depan



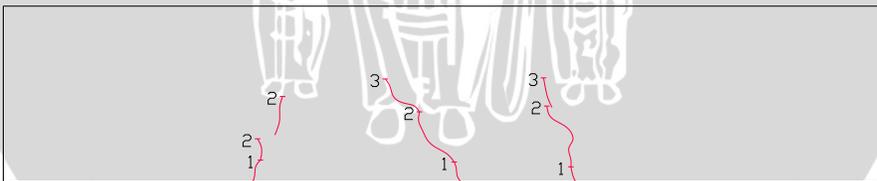
Balok no 35 sisi belakang



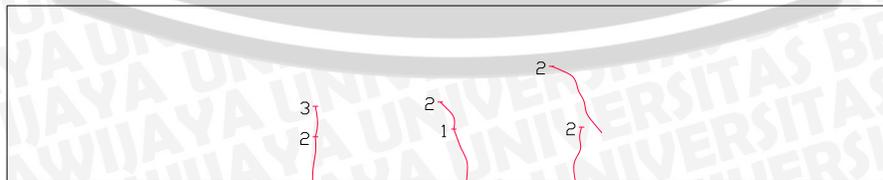
Balok no 36 sisi depan



Balok no 36 sisi belakang



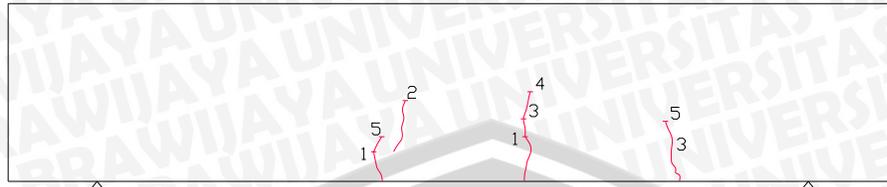
Balok no 44 sisi depan



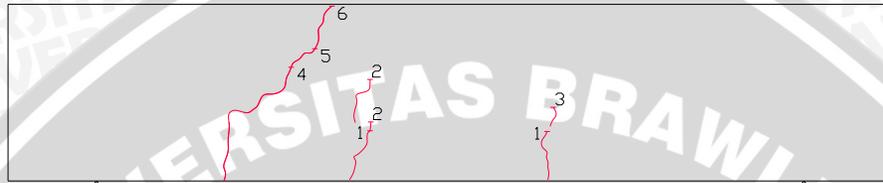
Balok no 44 sisi belakang



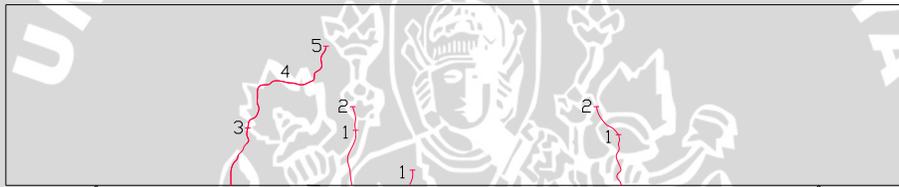
Gambar Lebar retak balok suhu 400° perlakuan tidak disiram



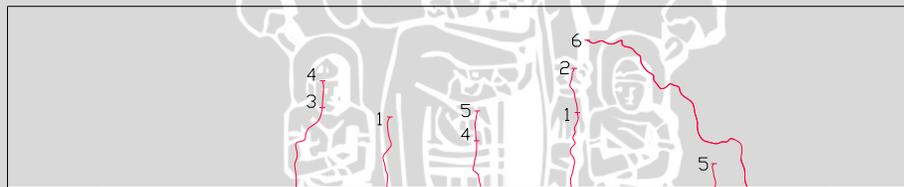
Balok no 48 sisi depan



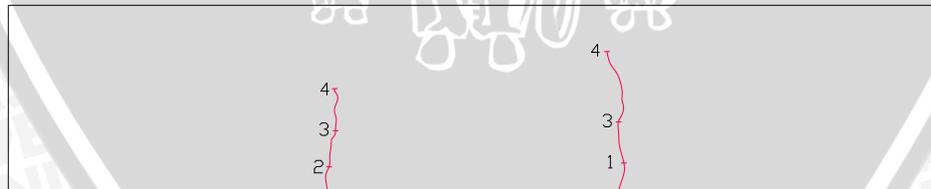
Balok no 48 sisi belakang



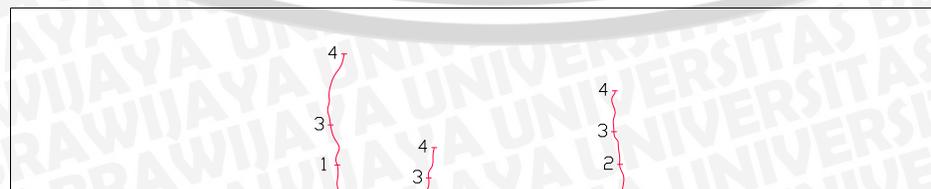
Balok no 49 sisi depan



Balok no 49 sisi belakang



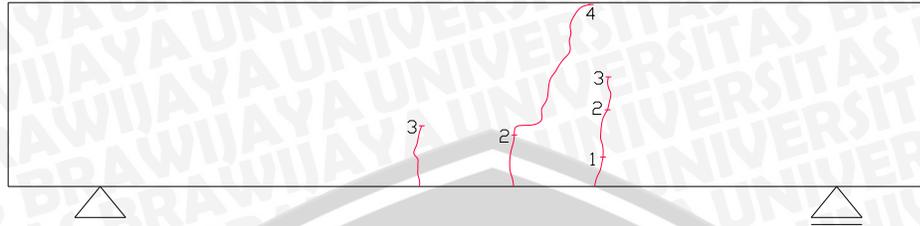
Balok no 39 sisi depan



Balok no 39 sisi belakang



Gambar Lebar retak balok suhu 400° perlakuan disiram



Balok no 45 sisi depan



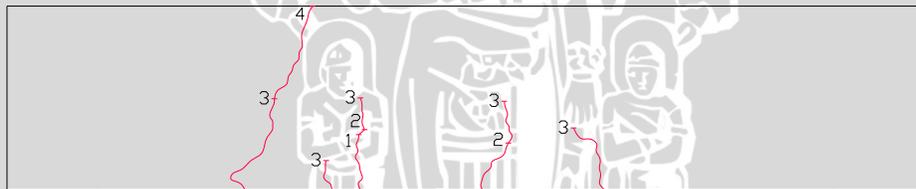
Balok no 45 sisi belakang



Kondisi Balok Rusak



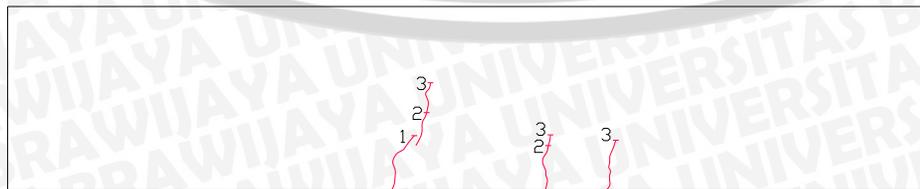
Balok no 43 sisi depan



Balok no 43 sisi belakang



Balok no 47 sisi depan



Balok no 47 sisi belakang



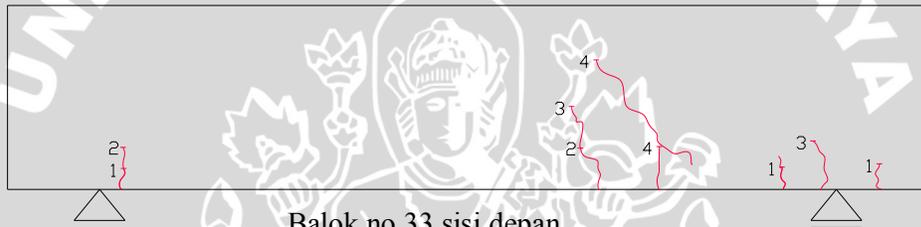
Gambar Lebar retak balok suhu 600° perlakuan tidak disiram



Balok no 41 sisi depan

Kondisi Balok Rusak

Balok no 41 sisi belakang



Balok no 33 sisi depan



Balok no 33 sisi belakang



Balok no 31 sisi depan



Balok no 31 sisi belakang



Gambar Lebar retak balok suhu 600° perlakuan disiram



Balok no 30 sisi depan



Balok no 30 sisi belakang



Balok no 38 sisi depan



Balok no 38 sisi belakang



Balok no 40 sisi depan



Balok no 40 sisi belakang

Kondisi Balok Rusak



