

REKAYASA SIPIL

Volume 11, Nomor 2 JUNI 2017

Eksperimen dan Analisis Lebar Retak Pada Balok Beton Bertulang Pasca Paparan Suhu Tinggi
Rizki Prasetya, Edhi Wahyuni, Wisnumurti

Pemodelan Peningkatan Akurasi Estimasi Biaya Dengan Metode *Structural Equation Modeling-Partial Least Square* Pada Proyek Jalan Provinsi Kalimantan Tengah
Yanda Christian, Harimurti, Indradi Wijatmiko

Pemeriksaan Kesesuaian Kriteria Fungsi Jalan dan Kondisi Geometri Simpang Akibat Perubahan Dimensi Kendaraan Rencana
Angga Marditama Sultan Sufanir

Model Strategi Pemasaran Jasa Konsultasi Kontraktor di Kalimantan Selatan
Candra Yuliana, Retna Hapsari Kartadipura

Perilaku Plate Girder Badan Bergelombang
Arya Rizki Darmawan, Agoes Soehardjono, Wisnumurti

Peningkatan Kinerja Operasi dan Pemeliharaan Jaringan Irigasi Pascal Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur
Cynthia Rahma Dewi, Eko Andi Suryo, As'ad Munawir

Kajian Kinerja Terminal Batu Ampar Kota Balikpapan
Randha Alief Chikita, Ludfi Djakfar, M. Ruslin Anwar

Perilaku Balok Baja I Non Prismatic (*Tapered Beam*)
Titin Sundar, Agoes Soehardjono, Wisnumurti

Analisis Pengendalian Risiko Terhadap Peningkatan Kinerja Pekerjaan Konstruksi (Studi Kasus Asrama Haji Gorontalo)
Evan Kusuma Wijaya, Edhi Wahjuni Setyowati, Yulvi Zaika

Stability Analysis of Earth Dam Slopes Subjected to Earthquake Using ERT Results Interpretation
Eko Andi Suryo

Rekayasa Sipil	Vol.11	No. 2	Hal. 84 - 165	Malang Juni 2017	ISSN 1978 - 5658
-------------------	--------	-------	------------------	---------------------	---------------------



Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Brawijaya Malang

EKSPERIMEN DAN ANALISIS LEBAR RETAK PADA BALOK BETON BERTULANG PASCA PAPARAN SUHU TINGGI

Rizki Prasetya^{*1}, Edhi Wahyuni², Wisnumurti²

¹Mahasiswa / Program Magister / Jurusan Teknik Sipil / Fakultas Teknik / Universitas Brawijaya

²Dosen / Jurusan Teknik Sipil / Fakultas Teknik / Universitas Brawijaya
Jalan Mayjend Haryono 167 Malang 65145 Indonesia
Korespondensi : praz.onpeace@gmail.com

ABSTRACT

Cracking is one of the structural behaviors reviewed under the service boundary conditions. Cracks will be the gaps in the various substances in the reinforced concrete structures that will make the structure vulnerable. The fragility of building structures due to exposure to high temperatures or fires can be observed from the behavior of structures when the boundary conditions and maximum crack widths become one of the conditions to how the strength of the structure can survive. This research aims to find how big influence of high temperature on reinforced concrete beam especially to crack width. The test performed is a bending test with a beam-sized test object (10 x 15 x 120) cm. The variation of this research is normal reinforced concrete beam (BN), exposed to temperature 400°C (BS1), exposure temperature 600°C (BS2), and exposure temperature of 800°C. The results show that the decrease of bending strength from normal temperature to 400°C is 10%, from normal temperature to 600°C at 22% and from normal temperature to 800°C at 29%. For the average crack width at normal beam load load of 0,148 mm, then for 400°C beam decrease and the average crack width is 0,095 mm. For the average crack width when the load of beam service 600°C increased and gained 0,696 mm, for beam of 800°C crack width at service load 0,276 decreased compared to beam 600°C.

Keywords : Service Boundary Conditions, Bending Capacity , Crack width , High Temperature, Reinforced Concrete Beam.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan bangunan yang memiliki daya tahan terhadap api yang relatif lebih baik dibandingkan dengan material lain seperti baja, terlebih lagi kayu. Hal ini disebabkan karena beton merupakan material dengan daya hantar panas yang rendah, sehingga dapat menghalangi rembetan panas ke bagian dalam struktur beton tersebut.

Efek meningkatnya suhu beton khususnya pada pasta semen yang terhidrasi tergantung pada tingkat hidrasi dan kelembaban yang terjadi, biasanya terjadi pada pasta portland semen yang sebagian besar terdiri dari *Calcium Silicate Hydrate* (CSH), *Calcium hydroxide*, dan *Calcium sulfoaluminate hydrates*. Pasta semen dalam kondisi jenuh mengandung sejumlah besar air bebas dan air kapiler, selain air yang terserap. Berbagai jenis

air tersebut dapat segera hilang jika terjadi peningkatan suhu beton.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kapasitas penampang balok dan lebar retak balok beton bertulang yang telah mengalami pemanasan kemudian dibandingkan dengan balok normal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Terhadap Suhu Tinggi

Komposisi beton yang terdiri dari pasta semen dan agregat merupakan komposisi yang mudah terurai jika terkena pemanasan. Pada proses kebakaran, dengan suhu melebihi suhu kamar, akan terjadi proses penguapan pada struktur karena pada beton normal yang dibakar akan mengalami penguapan air bebas dalam pori- pori kapiler yang berukuran besar dan

diikuti oleh pori-pori yang lebih kecil sehingga beton menjadi lebih porus [1].

Efek suhu tinggi pada beton ditinjau pada mikrostrukturnya. Perubahan pada temperatur rendah hingga temperatur tinggi mempengaruhi pengikat agregat atau pasta semen. Pada fase suhu 400°C fase portlandite mengalami kenaikan sehingga membuat beton menjadi lebih kompak, pada suhu 600°C portlandite mengalami penurunan dan ketika mencapai suhu 800°C portlandite menghilang [2].

2.2. Baja Terhadap Suhu Tinggi

Paparan suhu tinggi pada balok beton bertulang mempengaruhi kuat leleh baja tulangan yang telah dipanaskan secara langsung dengan beberapa variasi suhu selama 3 jam dan kemudian didinginkan dengan cara natural sesuai dengan suhu ruangan didapat kekuatan tarik baja tulangan dibawah suhu 500°C tidak berpengaruh signifikan sedangkan kuat tarik besi tulangan diatas 500°C berpengaruh signifikan yakni penurunan kekuatan hingga 10 – 15 % [3].

2.3. Keadaan Batas Layan

Keadaan batas layan (*serviceability limit state*) adalah suatu kegagalan pada kondisi batas layan meliputi yang meliputi gangguan fungsional dalam pemakaian struktur tetapi tidak menyebabkan keruntuhan dan dapat ditoleransi daripada dalam kasus kondisi batas ultimit. Secara sederhana konsep desain batas layan dapat dituliskan sebagai Perilaku Struktur Yang Diizinkan \geq Perilaku Struktur Yang Terjadi.

Beberapa perilaku struktur yang perlu ditinjau dalam kondisi batas layan antara lain lendutan (*deflections*), lebar retak (*crack width*), dan getaran (*vibrations*) [4].

2.4. Lebar Retak Balok Beton Bertulang

Lebar retak adalah salah satu perilaku struktur yang terjadi dan perlu ditinjau pada saat kondisi pada batas layan (*serviceability limit state*). Banyak peraturan yang ada pada saat sekarang ini dan digunakan untuk menentukan berapa standar lebar retak yang masih diperbolehkan ketika terjadi kegagalan pada suatu struktur pada kondisi batas layan. Lebar retak maksimum sendiri adalah suatu fungsi yang tergantung oleh kedalaman retak.

Beberapa peraturan terkait dengan lebar retak seperti SNI 03-2847-2002 [5] persamaan (1) dan Eurocode 2 1992-1 (2004) [6] persamaan (2).

$$\omega = 11 \times 10^{-6} \beta f_s (dc A)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$Wk = S_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (2)$$

Selain formula lebar retak dari peraturan, ada beberapa formula yang didapat dari hasil penelitian terhadap balok beton bertulang dengan berbagai macam variasi baik ukuran balok maupun tulangan yang dipakai. Penelitian ini memakai formula lebar retak Edhi Wahyuni [2] (3) dan S. H. Chowdhury dan Y. C. Loo [7] (4)

$$w = \left[\epsilon_s \left[\frac{1 \times \Delta t \times \gamma \times L \times U}{n \times A_c} \right] \right] \times \frac{f_t \times \theta}{2 \times \left(\frac{A_s}{A_c} \right) \times f_b T} \quad (3)$$

$$w_{max} = 1.5 w_{cr}$$

$$w_{cr} = (f_s/E_s) [0.6(c - s) + 0.1(\phi/\rho)] \quad (4)$$

3. METODOLOGI

Eksperimental dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang, sedangkan untuk proses paparan suhu tinggi dilakukan di UPT. Keramik Malang.

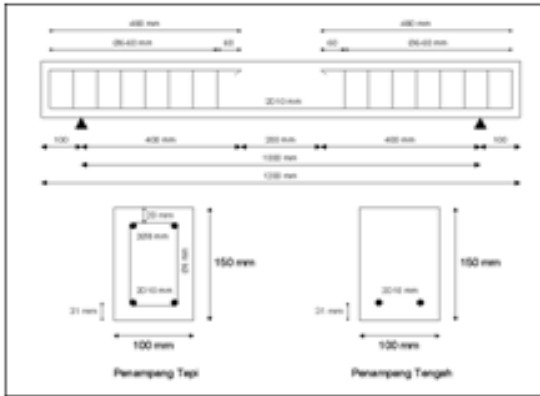
3.1. Material

Bahan campuran menggunakan semen PPC standar PT. Semen Gresik sedangkan agregat halus yang dipakai merupakan pasir hitam yang berasal dari Lumajang dengan agregat yang masuk kedalam zona 1 dengan lolos saringan mulai dari saringan no 4 hingga 200 sehingga didapat modulus kehalusan 3,5435.

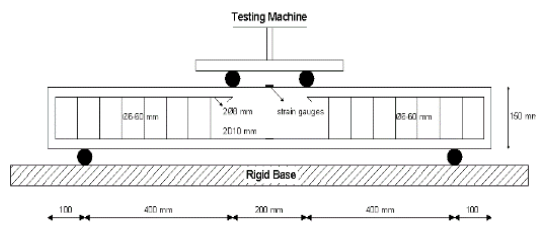
Agregat kasar yang digunakan berasal dari sekitaran Kota Malang dan lolos saringan no 3/4" sebanyak 5,06%, lolos saringan no 1/2" sebanyak 25,54%, lolos saringan no 3/8" sebanyak 38,58%, dan lolos saringan no 4 sebanyak 35,81%. Dari hasil analisis tersebut masuk dalam kriteria zona 2.

Tulangan utama menggunakan baja ulir diameter aktual 9,41 mm dengan tegangan leleh 394,1 MPa, tegangan putus 557,6 MPa serta modulus elastisitas 184252 MPa. Untuk tulangan sengkang menggunakan baja polos diameter aktual 5,78 mm dengan tegangan leleh 313,4 MPa.

3.2. Benda Uji



Gambar 1. Penampang memanjang dan melintang Balok



Gambar 2. Setting Up pengujian lentur balok dengan 2 beban P

Penggunaan benda uji pada penelitian ini adalah benda uji silinder beton dan benda uji balok beton bertulang. Silinder beton dengan ukuran 15 x 30 cm digunakan untuk uji tekan sebanyak 20 buah setiap variasi suhu. Untuk uji lentur menggunakan benda uji balok beton bertulang dengan ukuran 10 x 15 x 120 cm sebanyak 3 buah setiap variasi suhu. Pengamatan lebar retak pada saat pengujian dilakukan tiap 100 kg beban dengan menggunakan *crack detector*.

3.3. Proses Pemanasan Dan Pendinginan

Proses paparan suhu tinggi dilakukan dalam tungku pembakaran keramik yang menggunakan jenis tungku sirkulasi panas berbalik (*down draft klin*). Kecepatan paparan suhu yang digunakan sebesar $\pm 125^\circ\text{C}/\text{jam}$. Sedangkan alat pengukuran suhu menggunakan *thermocouple* dengan kapasitas maksimum 1200°C . Setelah proses paparan suhu tinggi kemudian balok beton bertulang didinginkan pada suhu ruang selama 24 jam, kemudian setelah itu baru dilakukan uji tekan silinder maupun uji lentur balok beton. Pengujian pembebanan pada balok dilakukan seperti pada **Gambar 2**.

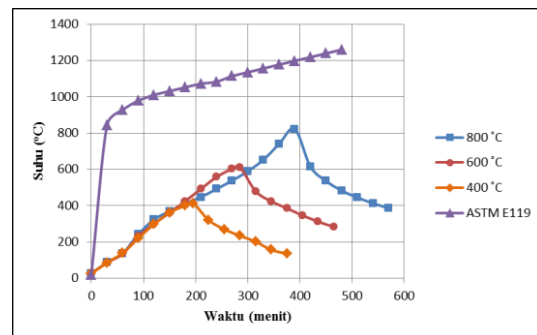


Gambar 3. Proses paparan suhu tinggi balok beton bertulang di dalam tungku pembakaran keramik

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Waktu Pembakaran

Kenaikan suhu pada penelitian ini untuk suhu 400°C , 600°C dan 800°C kurang lebih sama dengan periode kenaikan suhu 10°C tiap 5 menit. Untuk pencapaian suhu maksimal yakni suhu 400°C dicapai pada waktu 195 menit, suhu 600°C dicapai pada waktu 285 menit dan suhu 800°C dicapai pada waktu 390 menit.



Gambar 4. Kurva kenaikan dan penurunan suhu pembakaran

Pola penurunan suhu pada tungku pembakar pada suhu 400°C , 600°C dan 800°C kurang lebih hampir sama yakni 15°C tiap lima menit. Pola kenaikan dan penurunan suhu yang kurang lebih sama ini diharapkan setiap benda uji yang di uji pada suhu 400°C , 600°C dan 800°C mengalami proses paparan suhu yang sama.

4.2. Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton

Tabel 1. Tabel kuat tekan beton rata-rata

Suhu (°C)	Sample	fci (Mpa)
27	Silinder 15 x 30 cm	42,24
400	Silinder 15 x 30 cm	27,65
600	Silinder 15 x 30 cm	25,68
800	Silinder 15 x 30 cm	18,51

Hasil kuat tekan rata-rata berbeda antara beton suhu normal dengan beton yang telah terpapar suhu tinggi. Penurunan kuat tekan beton sekitar 35% ketika dipanaskan hingga suhu 400°C dan penurunan kuat tekan beton sekitar 37% ketika dipanaskan hingga suhu 600°C serta penurunan kuat tekan beton sekitar 57% ketika dipanaskan hingga suhu 800°C.

4.3. Pola Retak

Berdasarkan pada pengujian balok beton bertulang dapat diamati bahwa pola retak yang terjadi pada balok beton dengan variasi paparan suhu tinggi menghasilkan pola retak lentur. Pola retak yang terbentuk berada pada bentang tengah balok diantara titik beban yakni 1/5 panjang efektif balok.



Gambar 5. Pola Retak pada Balok Normal (BN), Balok 400°C (BS1), Balok 600°C (BS2) dan Balok 800°C (BS3)

Pada **Gambar 5** balok normal (BN) retak pertama terjadi pada waktu beban kurang lebih 700 kg, retak vertikal yang terjadi di daerah tarik balok dan tepat berada di tengah bentang. Pada saat beban 1900 kg yakni pada saat beban layan, 3 retakan ditengah bergerak menuju daerah tekan balok. Kemudian pada

saat beban maksimum 4000 kg, 3 retakan yang berada ditengah bentang semakin mendekati daerah tekan balok.

Gambar 5 balok 400°C (BS1) retak pertama terjadi pada waktu beban kurang lebih 500 kg. Pada saat beban 1700 kg yakni pada saat beban layan, 3 retakan ditengah bergerak menuju daerah tekan balok. Kemudian pada saat beban maksimum 3700 kg, 3 retakan yang berada ditengah bentang semakin mendekati daerah tekan balok.

Gambar 5 balok 600°C (BS2) retak pertama terjadi pada waktu beban kurang lebih 300 kg. Pada saat beban 1600 kg yakni pada saat beban layan, 3 retakan ditengah bergerak menuju daerah tekan balok. Kemudian pada saat beban maksimum 3200 kg, 3 retakan yang berada ditengah bentang semakin mendekati daerah tekan balok.

Gambar 5 balok 800°C (BS3) retak pertama terjadi pada waktu beban kurang lebih 300 kg. Pada saat beban 1600 kg yakni pada saat beban layan, 3 retakan ditengah bergerak menuju daerah tekan balok. Kemudian pada saat beban maksimum 3200 kg, 3 retakan yang berada ditengah bentang semakin mendekati daerah tekan balok.

4.4. Kapasitas Lentur Penampang Balok

Dari hasil pengujian lentur balok beton bertulang baik balok normal maupun balok yang telah terpapar suhu tinggi didapatkan hasil dari rerata beban yang mengakibatkan retak pertama (P_{cr}), retak layan (P_{layan}), dan retak maksimum (P_u).

Tabel 2. Hasil pengujian kapasitas lentur balok beton bertulang

Benda Uji	Beton Suhu	P_{cr}	P_{Layan}	P_u
	°C	Kg	Kg	Kg
BN	27	726,00	1613,33	4033,33
BS1	400	448,00	1418,67	3733,33
BS2	600	326,67	1241,33	3266,67
BS3	800	388,00	1228,67	3233,33

Pada **Tabel 2** diatas dapat dilihat bahwa akibat paparan suhu tinggi mengakibatkan turunnya kapasitas lentur balok bertulang jika dibandingkan balok normal. Penurunan rerata beban berturut-turut dari suhu normal ke suhu 400°C, 600°C dan 800°C pada saat retakan

pertama sebesar 38,3%, 55,0%, dan 46,5%, untuk besarnya beban layan sebesar 12,07%, 23,06%, dan 23,84%, sedangkan untuk besarnya beban maksimum sebesar 7,4%, 19,0%, dan 19,8%.

Pengaruh paparan suhu tinggi terhadap beton bertulang baik pada beton itu sendiri maupun pada tulangan membuat kuat lentur menjadi menurun. Berkurangnya kadar air semen akibat penguapan saat paparan suhu tinggi mengakibatkan ikatan antar agregat menjadi lemah serta mengakibatkan rongga pada beton membesar yang mengakibatkan retakan sehingga kuat tekan beton menurun. Kekuatan balok beton bertulang menjadi bertumpu pada kuat tarik tulangan, karena proses paparan suhu tinggi baik lama paparan maupun besarnya suhu mengakibatkan kuat tarik tulangan juga tereduksi. Tereduksinya kuat tekan beton maupun kuat tarik tulangan menjadikan penurunan kapasitas lentur balok beton bertulang akibat paparan suhu tinggi.

4.5. Analisis Teoritis Lebar Retak

Dari data pengujian yang sudah diperoleh, selanjutnya adalah menghitung lebar retak balok beton baik normal maupun sudah terpapar suhu tinggi dengan cara teoritis.

Tabel 3. Hasil perhitungan analisis teoritis lebar retak dengan berbagai rumus

HASIL ANALISIS TEORITIS						
Benda Uji	Beton Suhu	Beban Layan	SNI 2002	Eurocode 2004	Edhi Wahyuni	Chowdhury & Loo
	°C	Kg	mm	mm	mm	mm
BN	27	1651,84	0,0182	0,1699	0,0129	0,1728
BS1	400	1418,88	0,0163	0,1704	0,2455	0,1728
BS2	600	1351,43	0,0154	0,1703	0,3835	0,1728
BS3	800	1232,66	0,0154	0,1712	0,5320	0,1728

Lebar retak SNI 2002 yang didapat pada saat beban layan secara teoritis didapat bahwa lebar retak balok normal lebih besar daripada balok yang sudah terpapar suhu tinggi. Lebar retak untuk balok normal sebesar 0,0182 mm, balok 400°C sebesar 0,0163 mm, balok 600°C sebesar 0,0154 mm dan balok 800°C sebesar 0,0154 mm.

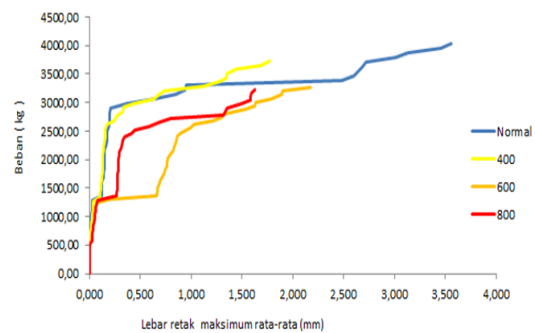
Untuk peraturan Eurocode 2004 lebar retak yang didapat mengalami peningkatan dari suhu normal hingga suhu 800°C yakni suhu

normal sebesar 0,1699 mm, suhu 400°C sebesar 0,1704 mm, suhu 600°C sebesar 0,1703 mm, dan suhu 800°C mengalami kenaikan lebar retak maksimum sebesar 0,1712 mm.

Sedangkan untuk perhitungan lebar retak maksimum Edhi Wahyuni hasil yang di dapat dari perhitungan teoritis dari suhu normal hingga suhu 800°C mengalami kenaikan besarnya lebar retak maksimum yakni dari lebar retak pada suhu normal adalah 0,0129 mm, suhu 400°C sebesar 0,2455 mm, suhu 600°C sebesar 0,3835 mm dan pada suhu 800°C mencapai 0,5320 mm.

Dan untuk rumus S. H. Chowdhury dan Y. C. Loo perhitungan lebar retak suhu normal hingga suhu 800°C tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Perhitungan teoritis yang didapat yakni dari lebar retak maksimum pada suhu normal hingga suhu 800°C relatif sama yaitu 0,1728 mm.

4.6. Eksperimen Lebar Retak



Gambar 6. Grafik hubungan antara lebar retak dengan beban balok pada suhu normal, 400°C, 600°C, dan 800°C

Dari **Gambar 6** dan **Tabel 4** pengujian balok normal (BN) retak pertama besarnya adalah 0,001 mm. Pada saat beban layan lebar retak rata – ratanya 0,127 mm. Saat beban maksimum lebar retak rata – rata yang berada di tengah bentang yakni 1/5 L adalah 3,555 mm. Balok 400°C (BS1) retak pertama 0,003 mm. Pada saat beban layan lebar retak rata – ratanya 0,109 mm. Beban maksimum lebar retak rata – ratanya sebesar 1,777 mm.

Balok 600°C (BS2) retak pertama sebesar 0,007 mm. Pada saat beban layan lebar retak rata – ratanya adalah 0,069 mm. Saat beban maksimum lebar retak rata – ratanya sebesar 2,084 mm. Balok 800°C (BS3) retak pertama sebesar 0,001 mm. Saat beban layan lebar retak rata – rata menjadi 0,069 mm.

Tabel 4. Tabel hasil eksperimen lebar retak balok beton bertulang

Hasil Eksperimen						
Balok Beton Suhu	Beban (kg)			Retak Rata-rata (mm)		
	P _{cr} (kg)	P _{Layan} (kg)	P _n (kg)	Retak Pertama (mm)	Retak Layan (mm)	Retak Ultimit (mm)
Normal (BN)	726,00	1613,33	4033,33	0,001	0,127	3,555
400°C (BS1)	448,00	1418,67	3733,33	0,003	0,109	1,777
600°C (BS2)	326,67	1241,33	3266,67	0,007	0,069	2,084
800°C (BS3)	388,00	1228,67	3233,33	0,004	0,069	1,627

4.7. Perbandingan Hasil Analisis dan Eksperimental

Tabel 5. Perbandingan hasil analisis teoritis dengan eksperimental

HASIL ANALISIS TEORITIS DAN EKSPERIMENTAL								
Benda Uji	Beton Suhu	Beban Layan Teoritis	Beban Layan Eksperimen	SNI 2002	Eurocode 2004	Edhi Wahyuni	Chowdhury & Loo	Eksperimen
	°C	Kg		mm	mm	mm	mm	
BN	27	1651,84	1613,33	0,0182	0,1699	0,0129	0,1728	0,1268
BS1	400	1418,88	1418,67	0,0163	0,1704	0,2455	0,1728	0,1094
BS2	600	1351,43	1241,33	0,0154	0,1703	0,3835	0,1728	0,0692
BS3	800	1232,66	1228,67	0,0154	0,1712	0,5320	0,1728	0,0691

Saat beban maksimum lebar retak rata – ratanya sebesar 1,627 mm.

Dari **Tabel 5** hasil perhitungan rumus lebar retak SNI 2002 balok normal hingga balok 800°C mendapatkan hasil perhitungan yang berbeda dan cenderung mengalami penurunan. Untuk perhitungan lebar retak Eurocode 2004 balok normal hingga balok 800°C mendapatkan hasil perhitungan yang berbeda dan cenderung mengalami kenaikan. Perhitungan teoritis menggunakan rumus Edhi Wahyuni mendapatkan yang cenderung mengalami kenaikan dari suhu normal ke suhu 800°C. Sedangkan untuk perhitungan rumus Chowdhury dan Loo mendapatkan hasil yang tetap dari suhu normal ke suhu 800°C. Perbedaan yang didapat dikarenakan penggunaan parameter pada masing-masing rumus yang berbeda sehingga ketika digunakan untuk menghitung lebar retak balok beton akibat paparan suhu tinggi hasil yang didapatkan cenderung berbeda – beda.

Hasil eksperimental yang dilakukan didapatkan hasil lebar retak rata-rata pada saat beban layan balok normal sebesar 0,1268 mm kemudian untuk balok 400°C mengalami

penurunan dan didapat lebar retak rata-rata sebesar 0,1094 mm. Untuk lebar retak rata-rata pada saat beban layan balok 600°C mengalami penurunan dan didapat sebesar 0,0692 mm, untuk balok 800°C lebar retak pada saat beban layan sebesar 0,0691 mengalami penurunan yang relatif kecil jika dibandingkan balok 600°C.

5. KESIMPULAN

1. Penurunan rerata beban berturut-turut dari suhu normal ke suhu 400°C, 600°C dan 800°C pada saat retakan pertama sebesar 38,3%, 55,0%, dan 46,5%, untuk besarnya beban layan sebesar 12,07%, 23,06%, dan 23,84%, sedangkan untuk besarnya beban maksimum sebesar 7,4%, 19,0%, dan 19,8%.
2. Pola retak pada keseluruhan benda uji balok adalah pola retak lentur dengan retak vertikal dari daerah tarik menuju daerah tekan beton. Retakan saat beban layan masing – masing balok berada pada tengah bentang atau 1/5 panjang efektif balok saat rerata beban 1613,33 kg balok normal, 1418,67 kg balok 400°C, 1241,33 kg pada balok 600°C, dan 1228,67 kg balok 800°C.
3. Hasil eksperimental lebar retak rata -rata pada saat beban layan berturut – turut dari balok normal, 400°C, 600°C, dan 800°C adalah 0,127 mm, 0,109 mm, 0,069 mm, dan 0,069 mm.
4. Hasil perhitungan teoritis lebar retak SNI 2002 balok normal hingga balok 800°C mendapatkan hasil yang cenderung mengalami penurunan. Untuk Eurocode 2004 balok normal hingga balok 800°C mendapatkan hasil yang cenderung mengalami kenaikan. Sedangkan perhitungan teoritis menggunakan rumus S. H. Chowdhury dan Y. C. Loo mendapatkan hasil yang tetap atau tidak berubah dan rumus Edhi Wahyuni mendapatkan hasil yang cenderung mengalami peningkatan dari suhu normal ke suhu 800°C. Hasil eksperimental dari suhu normal ke suhu 800°C cenderung turun.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anggraini, Retno, *Porositas Beton Mutu Tinggi Pasca Bakar*, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, 2008.

- [2] Setyowati, E. W., Soehardjono, A., Wardana, I. G. N. & Irawan, Y. S. 2015, *The Micro Crack Growth Behavior on the Post Fire Reinforced Concrete Beam*, International Journal of Engineering and Technology. 7 (5): 1856 – 1861.
- [3] Topcu, I. B., & Karakurt, C., *Properties of Reinforced Concrete Steel Rebars Exposed to High Temperatures*, Turki.
- [4] MacGregor, James G. 1997. *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- [5] Standar Nasional Indonesia, “*Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03 – 2847 – 2002)*”, ITS Press, Surabaya.
- [6] Eurocode 2, *Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings 1992-1*, European Committee for Standardization, 2004, Belgium.
- [7] Chowdury, Loo, *A New Formula for Prediction of Crack Widths in Reinforced and Partially Prestressed Concrete Beams*. Griffith University, Australia, 2001