

# KUAT TEKAN DAN DURABILITAS BETON SETELAH PAPAN SUHU TINGGI 400°C, 600°C DAN 800°C

Rizki Prasetya<sup>1</sup>, Moh Abduh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang,  
Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

Kontak Person:

Rizki Prasetya

Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

E-mail: [praz.onpeace@gmail.com](mailto:praz.onpeace@gmail.com), [abduh@umm.ac.id](mailto:abduh@umm.ac.id)

## Abstrak

*Kebakaran adalah reaksi oksidasi eksotermis yang berlangsung dengan cepat dari bahan bakar yang disertai dengan timbulnya api/penyalaan. Proses terjadinya kebakaran begitu cepat sehingga menimbulkan efek pada bangunan jika kebakaran tersebut terjadi di kawasan padat baik perumahan/perkantoran. Kualitas daya tahan beton terhadap api lebih baik dibandingkan dengan baja dan kayu. Saat terjadi kebakaran khususnya pada gedung dengan struktur menggunakan beton bertulang, suhu panas dari api mempengaruhi durabilitas dan kuat tekan beton. Perubahan ini dapat mempengaruhi kekuatan beton. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengamatan benda uji balok (10 x 15 x 120 cm) dan kuat tekan silinder beton (15 x 30 cm). Variasi penelitian yaitu beton silinder dan balok beton bertulang suhu normal (BL1), terpapar suhu 400°C (BL2), 600°C (BL3), dan 800°C (BL4). Dari hasil penelitian kuat tekan rata-rata sebesar 43,059 Mpa untuk beton normal, 28,212 Mpa untuk beton suhu 400°C, 27,239 Mpa untuk beton suhu 600°C, dan 18,875 Mpa untuk beton suhu 800°C. Durabilitas beton suhu 400°C beton akan berubah warna menjadi merah muda. Untuk suhu diatas 600°C berwarna abu-abu agak hijau dan suhu 800°C berwarna abu-abu. Kemudian beton mengalami retak rambut saat terpapar suhu 400°C, terpapar suhu 600°C - 800°C beton mengalami retak dan mengelupas.*

**Kata kunci:** Suhu, Beton, Kuat Tekan, Durabilitas

## 1. 1. Pendahuluan

Kebakaran adalah reaksi oksidasi eksotermis yang berlangsung dengan cepat dari suatu bahan bakar yang disertai dengan timbulnya api/penyalaan. Terjadinya kebakaran tidak bisa diprediksi seperti bencana meletusnya gunung berapi ataupun terjadinya tsunami. Proses terjadinya kebakaran begitu cepat sehingga menimbulkan efek pada bangunan jika kebakaran tersebut terjadi di kawasan padat baik perumahan maupun perkantoran [1].

Ada beberapa bahan bangunan yang memiliki daya tahan terhadap api yang relatif baik, salah satunya adalah beton. Kualitas daya tahan beton terhadap api lebih baik jika dibandingkan dengan baja dan kayu, untuk kayu kualitas tahan terhadap api amat sangat rendah. Oleh karena itu beton menjadi material yang mempunyai daya hantar panas rendah, sehingga perambatan panas yang ada untuk masuk kedalam inti beton sangatlah kecil [2].

Pada saat terjadi kebakaran khususnya yang terjadi pada gedung dengan struktur menggunakan beton bertulang, suhu panas dari api akan mempengaruhi sifat fisik pada beton. Perubahan sifat fisik pada beton dapat mempengaruhi kekuatan beton. Sejauh mana kuat tekan dan perubahan fisik yang terlihat pada beton setelah terjadinya kebakaran dapat diketahui dengan pendekatan pada penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kuat tekan dan durabilitas / perubahan fisik pada beton pasca paparan suhu tinggi untuk mengetahui tingkat kerusakan lingkungan atau perlindungan / penyelamatan lingkungan secara dini.

## 2. 2. Metode Penelitian

### 2.1 Beton

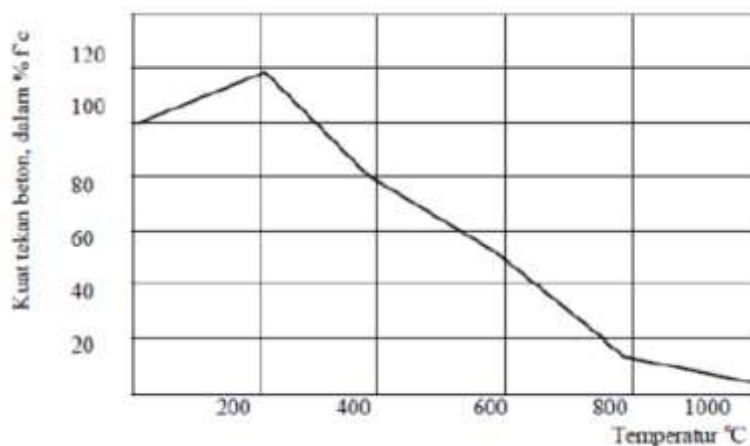
Menurut SNI-03-2847-2002 [3], pengertian beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidraulik lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. Tetapi belakangan ini definisi dari beton sudah semakin luas, yaitu beton adalah bahan yang terbuat dari berbagai macam tipe semen, agregat dan juga bahan pozzolan, abu terbang, serat, fiber dll [4]. Pada umumnya beton terdiri dari ± 15 % semen, ± 8 % air, ± 3 % udara, selebihnya pasir dan kerikil. Campuran tersebut setelah mengeras mempunyai sifat yang berbeda-beda,

tergantung pada cara pembuatannya. Perbandingan campuran, cara pencampuran, cara mengangkat, cara mencetak, cara memadatkan, dan sebagainya akan mempengaruhi sifat-sifat beton [5]

## 2.2 Beton Terhadap Suhu Tinggi

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 perambatan panas ke bagian dalam struktur beton tersebut.

Efek meningkatnya suhu 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. Namun, dari sudut pandang perlindungan terhadap kebakaran, dapat dicatat bahwa, karena panas yang cukup maka penguapan dibutuhkan untuk mengkonversi air menjadi uap, suhu beton tidak akan naik sampai semua air yang telah ter-evaporasi hilang [6]



**Gambar 1.** Penurunan Kuat Tekan Beton pada berbagai temperatur (Suhendro, 2000)

Porositas dan mineralogi agregat mempunyai pengaruh penting pada perilaku beton pada waktu terbakar. Tergantung pada tingkat pemanasan dan ukurannya, permeabilitas, dan kelembaban agregat, serta pori agregat itu sendiri sangat mungkin rentan proses pembakaran tersebut dan pada saat pendinginan [6]. Sifat kimia maupun fisika serta perubahan mineral yang terkandung pada suatu agregat mengalami perubahan akibat suhu tinggi. Transformasi agregat yang terjadi akibat suhu tinggi tergantung pada jenis agregatnya 350°C - kerikil sungai, 570°C - agregat mengandung silika, 650°C - agregat berkapur, 700 ° C - agregat basalt.

Agregat yang mengandung silika seperti kuarsa (misalnya, granit dan batu pasir), bisa menyebabkan kehilangan tegangan dalam beton pada suhu sekitar 573°C, karena pada temperatur ini kuarsa bertransformasi dari bentuk  $\alpha$  menjadi  $\beta$  dikaitkan dengan ekspansi sekitar 0,85 persen. Dalam kasus karbonat batuan, kehilangan tegangan yang sama dimulai di ketika suhu diatas 700°C sebagai akibat dari reaksi decarbonation. Selain kemungkinan transformasi fasa dan panas dekomposisi agregat, mineralogi agregat juga menentukan respon ketika beton terbakar.

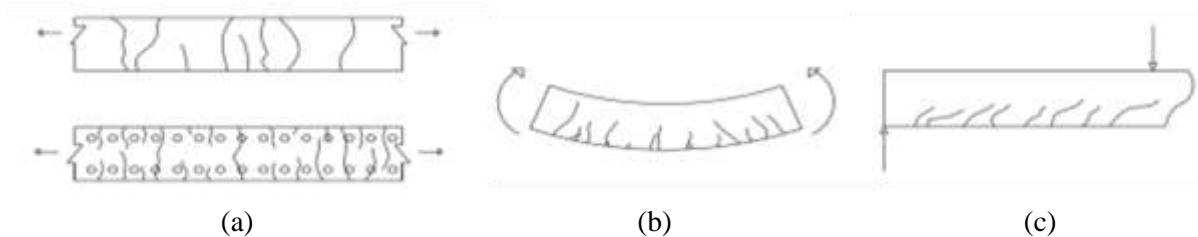
Penelitian oleh Edhi Wahyuni [7] menunjukkan bahwa kuat tekan beton yang dipanaskan dalam tungku pada temperatur 200°C mengalami penurunan sebesar 13,5 % dibandingkan dengan beton normal. Sedangkan pada suhu 400 - 800°C mengalami penurunan 50-85 %. Penurunan ini disebabkan karena adanya proses dekomposisi unsur C-S-H yang terurai menjadi kapur bebas CaO serta SiO<sub>2</sub> yang tidak memiliki kekuatan sama sekali. Karena unsur C-S-H merupakan unsur utama yang menopang kekuatan beton, maka pengurangan C-S-H yang jumlahnya cukup banyak akan sangat mengurangi

kekuatan beton. Jika suhu dinaikkan sampai mencapai  $1000^{\circ}\text{C}$  terjadilah proses karbonisasi yaitu terbentuknya Calcium Carbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) yang berwarna keputih-putihan sehingga merubah warna permukaan beton menjadi lebih terang. Disamping itu pada temperatur ini terjadi penurunan lekatan antara batuan dan pasta semen, yang ditandai oleh retak-retak dan oleh kerapuhan beton (mudah dipecah dengan tangan).

### 2.3 Retak Beton Akibat Perubahan Suhu

Retak pada struktur bangunan merupakan salah satu perilaku struktur yang terjadi pada kondisi batas layan atau pada saat kondisi serviceability limit state. Retakan yang terjadi pada suatu struktur bangunan yang terjadi harus seminimum mungkin, karena retak yang berlebih sangat berpengaruh terhadap korosi pada tulangan, serta menjadi keprihatinan atau ketakutan pada orang awam.

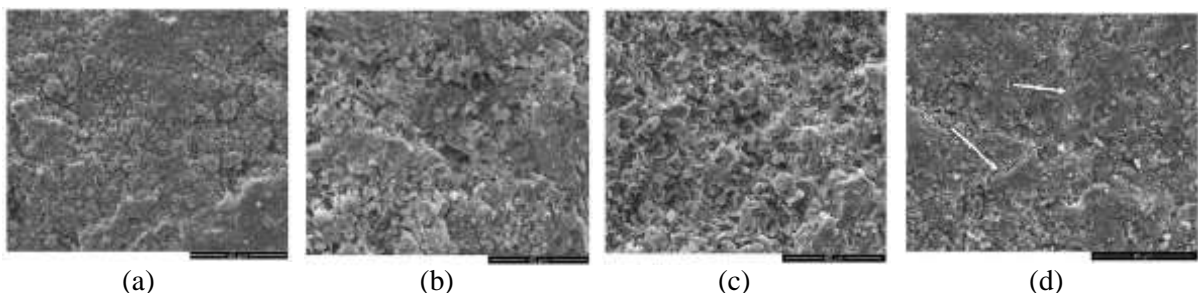
Retak terjadi di sepanjang balok dimana momen aktualnya lebih besar daripada momen retak. Karena beton pada daerah yang mengalami retak tersebut jelas tidak dapat menahan tegangan tarik, maka baja yang harus melakukannya. Tahap ini akan terus berlanjut selama tegangan tekan pada serat bagian atas lebih kecil daripada setengah dari kuat tekan beton  $f_c$  dan selama tegangan baja lebih kecil daripada titik lelehnya. Lebar retak merupakan salah satu faktor yang menyebabkan peningkatan laju korosi. Semakin banyak retak yang terjadi akibat pembebanan, semakin mudah air masuk ke dalam konstruksi beton. Apabila intrusi yang terjadi telah sampai ke tulangan, akan terjadi reaksi kimia antara air dengan baja tulangan yang menyebabkan korosi [8].



**Gambar. 2.** (a) Pola retak beton bertulang akibat gaya tarik, (b) Pola retak beton bertulang akibat momen, (c) Pola retak beton bertulang akibat geser. (Nawy, E.G 1998).

Gambar diatas adalah pola – pola retak yang seringkali ditemui pada beton bertulang. Pada struktur bangunan, dewasa ini banyak digunakan bahan-bahan kuat tinggi, termasuk penggunaan bahan beton dan baja tulangan. 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.

Tidak bisa diabaikan bahwa suhu dapat mengakibatkan keretakan pada beton bertulang. Perubahan suhu dari suhu rendah ke suhu tinggi mengakibatkan pemuaiannya pada beton dan akan mengakibatkan keretakan. Uji XRD dan uji EDAX yang telah dilakukan oleh [7] menunjukkan bahwa suhu pembakaran mempengaruhi kondisi senyawa kimia, senyawa kimia  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  atau portlandite dan  $\text{SiO}_2$  atau silika yang mengakibatkan perubahan sifat mekanik pada beton.



**Gambar 3.** Scanning Elektro Mikro dari beton setelah paparan suhu tinggi (a).  $27^{\circ}\text{C}$ , (b).  $400^{\circ}\text{C}$ , (c).  $600^{\circ}\text{C}$  dan (d).  $800^{\circ}\text{C}$ .

Portlandite bertindak sebagai bahan pengikat pada campuran beton, penurunan portlandite

sangat mempengaruhi kekuatan beton, hal tersebut ditunjukkan oleh beban yang diperlukan untuk mendapatkan lebar retak lebih rendah ketika suhu pembakaran beton lebih tinggi dari 400°C. Pada penelitiannya didapatkan bahwa SiO<sub>2</sub> sangat penting dalam beton dikarenakan senyawa ini memiliki fungsi sebagai bahan pengisi. Selain itu, senyawa tersebut dapat meningkatkan kuat tekan dan permeabilitas beton karena kemampuan dalam mengisi pori – pori pada beton.

Pada beton juga terjadi retak susut. Retak susut terjadi karena pengurangan volume (susut) ketika beton mengeras dimulai dari ketika setelah beton diaduk yang disebabkan oleh penyerapan air oleh semen dan agregat kemudian berlanjut pada penguapan air yang naik ke permukaan beton. Hidrasi semen yang terjadi menimbulkan sejumlah besar panas dan dengan mendinginnya beton terjadi penurunan panas. Apabila proses tersebut berlangsung lama maka akan terjadi muai/susut pada beton itu sendiri.

#### 2.4 Bahan, Peralatan dan Benda Uji yang digunakan

Penelitian ini menggunakan bahan dan peralatan yang disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. Bahan alam yang digunakan untuk benda uji diperoleh dari kota Malang dan beberapa dari luar kota Malang.

- a) Bahan campuran beton dan baja tulangan yang digunakan untuk balok beton bertulang adalah : Semen PPC ( Portland Pozzolan Cement ) Produksi PT. Semen Gresik, Agregat halus dari Malang dan sekitarnya, Agregat kasar dari Malang dan sekitarnya. Air yang diperoleh dari PDAM Kota Malang. Baja tulangan Ø6 mm polos untuk tulangan sengkang, Ø8 mm polos dan Ø10 ulir untuk tulangan utama.
- b) Peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian adalah peralatan pembakaran benda uji adalah tungku pembakaran keramik lengkap dengan termokopel milik UPT Keramik Disperindag Provinsi Jawa Timur di Jalan Sunandar Priyo Sudarmo No 22, Kota Malang, Compression Testing Machine berfungsi untuk menguji kuat tekan benda uji silinder.
- c) Benda uji yang digunakan yaitu Benda uji kuat tekan silinder ukuran 15 x 30 cm, Benda uji tekan lentur balok beton bertulang ukuran 10 x 15 x 120 cm. Set mix campuran beton menggunakan peraturan SNI yang berumur 28 hari.
  1. Rincian benda uji sebagai berikut :

**Tabel 1.** Benda uji silinder

Benda Uji Silinder	Suhu	Jumlah
SL1	27°C	20
SL2	400°C	20
SL3	600°C	20
SL4	800°C	20

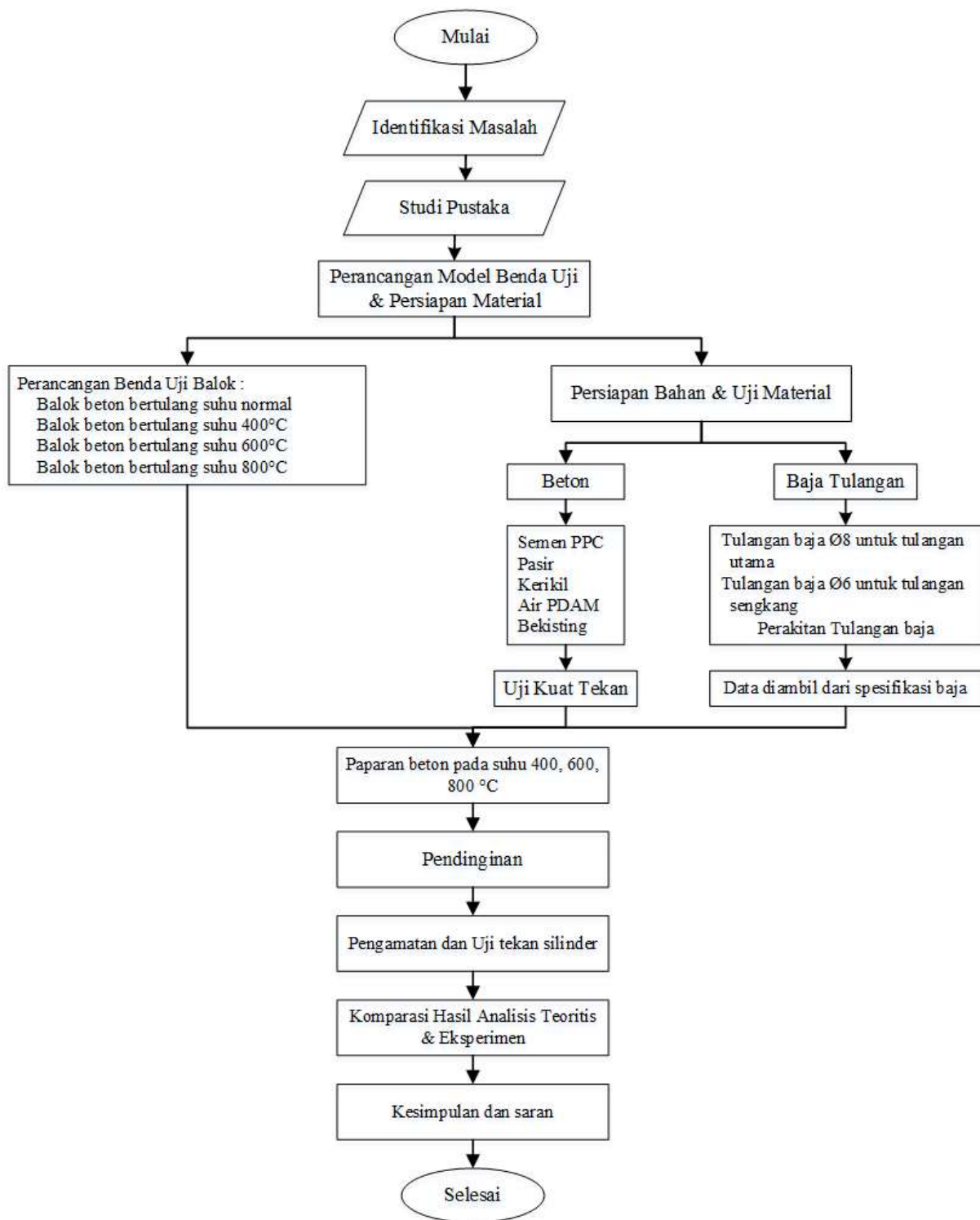
Sumber : Hasil Penelitian

**Tabel 2.** Benda uji balok

Benda Uji Balok	Suhu	Jumlah
BL1	27°C	3
BL2	400°C	3
BL3	600°C	3
BL4	800°C	3

Sumber : Hasil Penelitian

#### 2.5 Flowchart proses pengerjaan



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Bahan Material Penyusun Beton

Sifat-sifat beton pada umumnya dipengaruhi oleh kualitas bahan, cara pengerjaan, dan cara perawatannya. Karakteristik semen mempengaruhi kualitas beton dan kecepatan pengerasannya. Gradasi agregat halus mempengaruhi pengerjaannya, sedang gradasi agregat kasar mempengaruhi kekuatan beton. Kualitas dan kuantitas air mempengaruhi pengerasan dan kekuatan [9]

Mulyono [10] mengungkapkan bahwa beton merupakan fungsi dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolis, agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambah. Sedang Sagel [3] menguraikan bahwa beton adalah suatu komposit dari bahan batuan yang direkatkan oleh bahan ikat. Sifat beton dipengaruhi oleh bahan pembentuknya serta cara pengerjaannya. Semen mempengaruhi kecepatan pengerasan beton. Selanjutnya kadar lumpur, kebersihan, dan gradasi agregat mempengaruhi kekuatan pengerjaan yang mencakup cara penuangan, pemadatan, dan perawatan, yang pada akhirnya mempengaruhi kekuatan beton.

Untuk mendapatkan mutu beton dengan kuat tekan beton 35 Mpa maka bahan-bahan yang digunakan harus baik dan sesuai dengan takaran. Bahan 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.

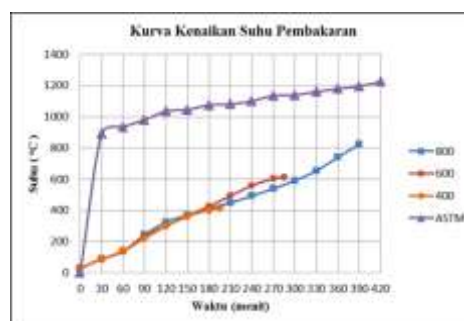
Agregat kasar yang digunakan berasal dari sekitaran Kota Malang dan lolos saringan no 3/4" sebanyak 5,06%, lolos saringan no 1/2" sebanyak 25,54%, lolos saringan no 3/8" sebanyak 38,58%, dan lolos saringan no 4 sebanyak 35,81%. Dari hasil analisis tersebut masuk dalam kriteria zona 2. Untuk mendapatkan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

#### 3.2 Waktu Pembakaran

Setelah benda uji silinder dan benda uji balok beton bertulang jadi maka proses berikutnya adalah paparan benda uji ke dalam tungku pembakar. Pembagian waktu dan hari pada waktu paparan suhu tinggi pada tungku pembakar disesuaikan dengan benda uji yang telah dibuat yakni benda uji untuk suhu 400°C, 600°C, dan 800°C.



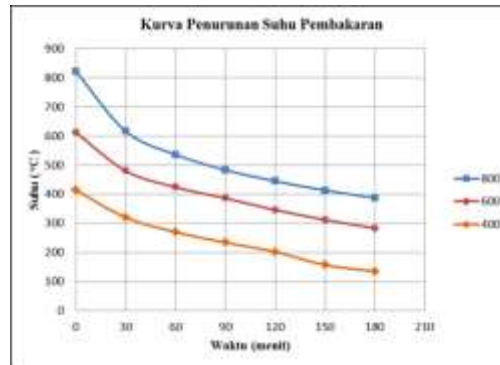
**Gambar 5.** Proses pembakaran benda uji silinder dan balok.  
(Sumber: Hasil Penelitian)



**Gambar 6.** Kurva Kenaikan Suhu Pembakaran  
(Sumber: Hasil Penelitian)



Penurunan suhu pada tungku pembakar setelah mencapai suhu maksimal pada penelitian ini juga dapat dilihat pada kurva dibawah ini.



**Gambar 7.** Kurva Penurunan Suhu  
(Sumber: Hasil Penelitian)

### 3.3 Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton

Menurut Widodo [11] kuat tekan beton adalah kemampuan beton keras untuk menahan gaya tekan dalam setiap satu satuan luas permukaan beton. Jenis semen. Semen tipe I cenderung bereaksi lebih cepat daripada PPC. Semen tipe I akan mencapai kekuatan 100% pada umur 28 hari, sedangkan PPC diasumsikan mencapai kekuatan 100% pada umur 90 hari.

Pengujian kuat tekan silinder menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 43,059 Mpa untuk beton normal, 28,212 Mpa untuk beton suhu 400°C, 27,239 Mpa untuk beton suhu 600°C, dan 18,875 Mpa untuk beton suhu 800°C. Besaran kuat tekan rata-rata dapat dilihat pada tabel dibawah ini digunakan dalam perhitungan teoritis dalam penelitian ini.

**Tabel 3.** Tabel kuat tekan beton rata-rata

Suhu ( °C )	Sample	fci ( Mpa )
27	Silinder 15 x 30 cm	43,059
400	Silinder 15 x 30 cm	28,212
600	Silinder 15 x 30 cm	27,239
800	Silinder 15 x 30 cm	18,875



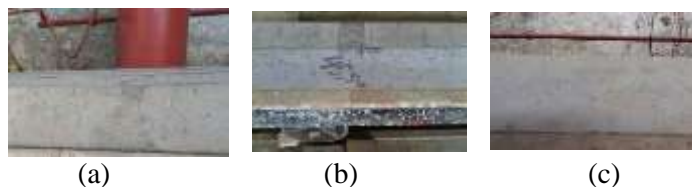
**Gambar 6.** Kurva hubungan kuat tekan beton dengan suhu.  
(Sumber: Hasil Penelitian)

Dapat dilihat hasil kuat tekan rata-rata yang di dapat terjadi perbedaan antara beton suhu normal dengan beton yang telah terpapar suhu tinggi. Terlihat bahwa suhu mempengaruhi kuat tekan beton, sebagaimana 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. Hal ini dipengaruhi oleh transformasi agregat yang terjadi pada suhu 350°C - 900°C.

### 3.4 Durabilitas Beton

Keunggulan lain yang dimiliki beton dibandingkan dengan material lainnya adalah mempunyai kuat tekan dan stabilitas volume yang baik dan biaya perawatannya relatif lebih murah. Selain itu, material beton lebih tahan terhadap pengaruh lingkungan, tidak mudah terbakar, dan lebih tahan terhadap suhu tinggi, sehingga banyak digunakan Universitas Sumatera Utara sebagai pelindung struktur baja terhadap pengaruh kebakaran pada bangunan gedung [12]

Setelah terjadinya paparan suhu tinggi pada benda uji beton maka sifat fisik yang dapat dilihat yakni pada gambar dibawah ini :



**Gambar 7.** Retak akibat proses paparan suhu tinggi (a) 400°C (b) 600°C dan (c) 800°C  
(Sumber: Hasil Penelitian)

Terjadinya friksi antar material penyusun beton akibat perbedaan koefisien muai termal materi penyusun yang cukup besar. Jika perbedaan koefisien muai agregat dan pasta semen terlalu besar maka apabila terjadi perubahan suhu dapat mengakibatkan perbedaan gerakan sehingga dapat melepaskan lekatan antara agregat dan pasta, akibatnya beton akan mudah retak [2] Kemudian karena proses paparan suhu tinggi maka menyusutnya pasta semen karena hilangnya kadar air akibat temperatur tinggi. Penyusutan ini akan menimbulkan retak-retak sehingga memperlemah beton [1]

Terjadi perubahan sifat fisik pada beton setelah proses paparan suhu tinggi pada beton baik benda uji silinder maupun balok beton. Beton normal yang pada awalnya mempunyai warna yang abu-abu setelah terkena paparan suhu tinggi mengalami perubahan warna menjadi sedikit memutih dan menguning. Hal ini disebabkan karena terjadi hidrasi pada pasta semen. Dan permukaan benda uji beton menjadi retak permukaan (spalling). Spalling terjadi ketika tekanan uap air di dalam beton meningkat lebih cepat daripada tekanan permukaan ketika uap air terbebas ke atmosfer.

Selain hal tersebut di atas, panas juga menyebabkan beton berubah warna. Bila beton dipanasi sampai suhu 400° C, beton akan berubah warna menjadi merah muda. Kemudian pada suhu 600° C, akan menjadi abu-abu agak hijau dan jika sampai suhu 900° C menjadi abu-abu kekuningan. Namun jika sampai di atas 1200° C akan berubah menjadi kuning. Dengan demikian, secara kasar dapat diperkirakan berapa suhu tertinggi selama kebakaran berlangsung berdasarkan warna permukaan beton pada pemeriksaan pertama.

Berat benda uji baik silinder maupun balok beton berkurang akibat paparan suhu tinggi. Berat benda uji silinder turun kurang lebih 10% dari berat awal pada suhu normal dan berat benda uji balok beton turun kurang lebih 7% dari berat awal pada suhu normal. Jadi dapat disimpulkan paparan suhu tinggi mempengaruhi sifat fisik beton baik dari permukaan beton, warna beton hingga berat beton itu sendiri.



#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai Kuat tekan rata-rata sebesar 43,059 Mpa untuk beton normal, 28,212 Mpa untuk beton suhu 400°C, 27,239 Mpa untuk beton suhu 600°C, dan 18,875 Mpa untuk beton suhu 800°C. Beton dipanasi sampai suhu 400° C beton akan berubah warna menjadi merah muda. Untuk suhu 400° C akan menjadi abu-abu agak hijau dan suhu mencapai 800° C menjadi abu-abu kekuningan. Beton mengalami retak rambut saat terpapar suhu hingga 400° C, terpapar suhu 600° C hingga 800° C beton mengalami retak dan mengelupas.

#### Referensi

- [1] S. Mindess, Y. J. Francis, and D. Darwin, "Concrete 2nd edition Prentice Hall," ed: pearson Education, Inc Upper Saddle River, NT, 2003.
- [2] K. Tjokrodiluljo, "Pemanfaatan Breksi Batu Apung Asal Pleret Untuk pembuatan Bata Ringan Sebagai Pengganti Bata Merah Pejal," *Media Teknik*, vol. 25, 2003.
- [3] R. Sagel, P. Kole, and G. Kusuma, "Pedoman Pengerjaan Beton Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03, Jakarta," *Penerbit Erlangga*, 1994.
- [4] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete technology*: Longman Scientific & Technical England, 1987.
- [5] S. Wuryati and R. Candra, "Teknologi Beton," *Kanisius, Yogyakarta*, 2001.
- [6] P. K. Mehta, "Concrete. Structure, properties and materials," 1986.
- [7] H. B. P. TINGGI, "PERILAKU MEKANIK BETON BERSERAT BAJA PADA SUHU TINGGI," 2012.
- [8] E. G. Nawy and B. Chen, "Deformational behavior of high performance concrete continuous composite beams reinforced with prestressed prisms and instrumented with bragg grating fiber optic sensors," *Structural Journal*, vol. 95, pp. 51-60, 1998.
- [9] L. Murdock, K. Brook, and S. Hindarko, "Bahan dan Praktek Beton, edisi keempat," *Penerbit Erlangga Jakarta*, 1986.
- [10] T. Mulyono, "Teknologi Beton Edisi II," ed: Yogyakarta, Andi, 2006.
- [11] S. Aris and W. Slamet, "Analisis variasi kandungan semen terhadap kuat tekan beton ringan struktural agregat pumice," *J. Anal*, pp. 2-4, 2013.
- [12] S. Hidayat, *Semen: jenis & aplikasinya*: Kawan Pustaka, 2009.