

PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO BETON PASCA BAKAR DENGAN PERBEDAAN PROSES PENDINGINAN

Retno Anggraini, Edhi Wahyuni S

Jurusan Teknik Sipil

Universitas Brawijaya Malang

ABSTRAK

Pada studi kasus gedung pasca kebakaran, perlu diketahui tentang kekuatan struktur beton khususnya perbandingan kuat tekan sisa beton akibat temperatur tinggi suhu pembakaran pada saat kondisi pendinginan tanpa penyiraman dan kondisi pendinginan disertai penyiraman serta keadaan beton (perubahan warna, kerusakan, perubahan struktur mikro) yang terjadi. Penelitian ini dilakukan dengan memberikan temperatur pada benda uji yaitu 200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C dengan faktor air semen tetap pada umur setelah 28 hari akan dilakukan penyiraman setelah beton dibakar pada suhu yang telah ditetapkan. Proses pembakaran dilakukan menggunakan *burner* dengan kapasitas suhu maksimum 1000°C dan dimensi 2x1,5x1,5 m. Dari analisa regresi diperoleh persamaan regresi kuadratik ganda yang menunjukkan bahwa kuat tekan menurun seiring dengan adanya peningkatan suhu (suhu pembakaran). Terjadi perubahan warna pada beton setelah mengalami pembakaran di setiap suhu yaitu pada suhu 200°C warna beton berubah menjadi abu-abu keputihan, suhu 400°C warna beton menjadi coklat, suhu 600°C warna beton menjadi coklat susu dengan bintik-bintik merah tua dan suhu 800°C warna beton menjadi putih. Dari hasil pengujian *X-Ray Fluorescence* terlihat bahwa setelah beton mengalami perubahan temperatur maka akan terjadi perubahan susunan unsur kimia dalam beton, hal ini dimungkinkan pada suhu tinggi unsur tersebut bereaksi atau mengalami pengikatan dengan unsur lainnya.

Kata kunci: temperatur tinggi, cara pendinginan, *X-Ray Fluorescence* (XRF).

PENDAHULUAN

Kebakaran sebagai salah satu bencana pada bangunan maupun industri, perlu semakin diwaspadai dalam setiap pembangunan sarana dan prasarana agar hasil-hasil pembangunan tersebut dapat dimanfaatkan hingga mencapai umur ekonomis yang diharapkan. Ditinjau dari jenis bangunan yang terbakar maka bangunan tempat tinggal menempati urutan pertama dengan jumlah kejadian 62 %, bangunan industri 15 %, pertokoan 11 %, perkantoran 7 % dan lainnya 5 %. Dimana penyebab utama kebakaran tersebut adalah akibat kelalaian manusia, baik kelalaian pada tahap perencanaan, pelaksanaan, maupun tahap pemanfaatan.

Adapun akibat dari kebakaran tersebut memiliki dampak yang kurang baik antara lain, korban jiwa, gedung beserta fasilitas-fasilitas yang terdapat dalam gedung itu sendiri dan lain-lain. Karena kebakaran

merupakan suatu bencana yang tidak diinginkan datangnya, serta perlu diwaspadai dan diperhatikan dalam suatu pembangunan baik berupa sarana maupun prasarana.

Terjadinya perubahan temperatur yang cukup tinggi, seperti yang terjadi pada peristiwa kebakaran akan membawa dampak pada struktur beton. Gejala yang umum timbul akibat kebakaran pada suatu gedung ialah permukaan struktur berwarna hitam atau lebih sering disebut *hangus/gosong* yang diakibatkan 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 mengalami proses perubahan fase fisis dan kimiawi secara kompleks. Hal tersebut berpengaruh terhadap perubahan perilaku material fisik beton yang mengakibatkan menurunnya kekuatan struktur beton.

Dari uraian di atas maka ada beberapa permasalahan yaitu:

1. Bagaimana perubahan warna, kerusakan, perubahan unsur kimia beton akibat temperatur tinggi pada saat umur beton setelah 28 hari yang didinginkan dengan kondisi pendinginan tanpa penyiraman?
2. Bagaimana perubahan warna, kerusakan, perubahan unsur kimia beton akibat temperatur tinggi pada saat umur beton setelah 28 hari yang didinginkan dengan cara penyiraman?

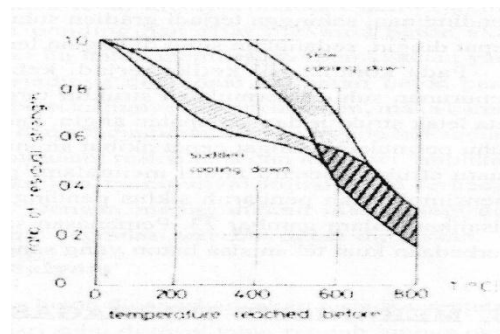
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur mikro dan perubahannya akibat suhu tinggi serta mengetahui pengaruh perubahan struktur mikro akibat pemanasan pada suhu 200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C. Temperatur yang diberikan yakni saat beton berumur setelah 28 hari.

TINJAUAN PUSTAKA

Ketika api kebakaran sudah padam akibat semprotan air pemadam kebakaran atau karena bahan yang terbakar sudah habis, maka masing-masing struktur akan mengalami siklus pendinginan. Suhu dipermukaan terutama di sudut penampang struktur akan mengalami penurunan yang sangat drastis, karena suhu di sekitar ruangan juga sudah turun lebih cepat. Namun sebaliknya suhu di bagian inti struktur justru masih mengalami kenaikan. Kenaikan suhu tersebut disebabkan oleh panas yang masih tersimpan di bagian dalam penampang cukup besar, sehingga masih

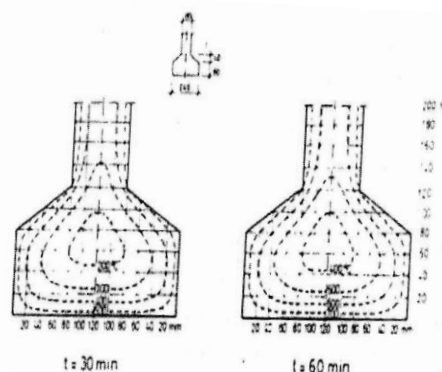
berlangsung konduksi panas ke bagian ini yang suhunya lebih rendah.

Ketika suhu permukaan struktur masih tinggi saat api sudah padam akibat bahan yang terbakar sudah habis atau mungkin ketika api masih berkobar, petugas pemadam kebakaran menyemprotkan air secara langsung ke struktur tersebut, maka permukaan struktur akan mengalami pendinginan mendadak (*shock cooling*). Akibatnya suhu di sub permukaan akan turun secara drastis, sedangkan suhu di bagian tengah relatif masih tinggi. Pada kondisi seperti ini juga akan menstimulir terjadinya retak-retak akibat tegangan panas, pengaruhnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Retak Beton

Gambar 2 memperlihatkan pola distribusi suhu pada suatu penampang balok yang mengalami pemanasan dari tiga bidang sisi sesuai karakteristik pemanasan standar-ISO 834, dengan waktu pemanasan 30 dan 60 menit.



Gambar 2. Pola Distribusi Suhu

Pada kondisi riil ketika terjadi kebakaran, maka setelah api padam penurunan suhu di permukaan struktur tergantung pada saat pemadaman api, tata letak struktur dan kecepatan angin pada kondisi yang ekstrem. Penurunan suhu permukaan sangat cepat akibat siraman air pemadam api dan di sisi lain suatu struktur secara alami mengalami pendinginan secara lambat. Untuk menstimulasikan pengaruh siklus pendinginan dilakukan percobaan hasilnya disajikan seperti Gambar 1. Pemanasan sampai suhu 600°C memperlihatkan kuat tekan beton yang sangat signifikan. *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 Ca(OH)². Penyiraman dilakukan hingga kondisi beton jenuh.

Menurut penelitian Amir Partowiyatmo (1996) tingkat *recovery* kekuatan beton setelah dilakukan *treatment* penyiraman dengan air mampu mendekati 100% dari kekuatan awal beton sebelum terbakar. Faktor utama yang sangat berpengaruh terhadap proses *recovery* kekuatan beton terbakar adalah 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.

Pengujian Perubahan Warna

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 1.

Tabel 1. Perubahan Warna Beton

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

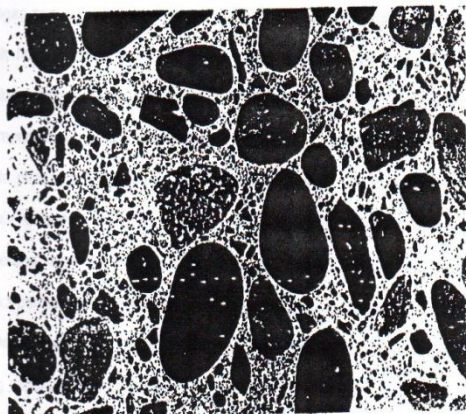
ASTM C 856 menjelaskan bahwa terjadinya perubahan warna pada beton pada variasi temperatur akibat dari terjadinya pergeseran agregat dari keadaan stabil pada temperatur rendah ke keadaan tidak stabil pada temperatur tinggi. Perbedaan-perbedaan yang terjadi disebabkan oleh faktor jenis material yang digunakan dan lama waktu pembakaran.

Struktur Mikro Beton

Menurut Mehta dan Monteiro (1993), analisis struktur beton sebagai rangka bangunan tergantung di antara ukuran dan penampang, serta dari distribusi dari penampilan fase utuh dari struktur. Elemen kasar dari material struktur dapat disiapkan, dan dilihat. Hal ini yang disebut dengan Struktur Makro, secara umum digunakan untuk melihat bagian yang kasar dari struktur, yang mampu dilihat oleh mata. Sedang elemen halus harus selalu dilihat dengan bantuan mikroskop. Batas resolusi dari kemampuan mata manusia diperkirakan seperlima milimeter atau 200 μm. Struktur Mikro digunakan dengan membesarkan porsi bagian terkecil dari Struktur Makro. Kapasitas pembesaran menggunakan mikroskop optik elektron, sampai dengan ukuran butir 10⁵ kali, ini dengan mengaplikasikan teknik transmisi dan penginderaan mikroskop optik elektron, dibuat dengan kemungkinan untuk menetapkan struktur material dan fraksi seukuran mikrometer.

Pada Gambar 3 potongan melintang penampang beton, terdiri dari dua bagian,

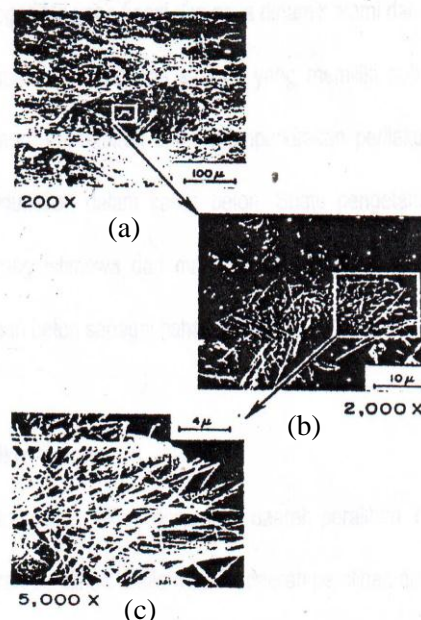
dapat dengan mudah dibedakan partikel-partikel agregat dengan ukuran bervariasi dan penampang, serta ikatan komposisi dari massa yang tidak beraturan dari pasta semen ($hcp = hydrate\ cement\ paste$). Pada kondisi mikroskopik, beton dipertimbangkan pada dua bagian material, terdiri dari partikel-partikel agregat disebarkan pada matriks pasta semen.



Gambar 3. Penampang Beton yang Dipoles

Pada tingkat mikroskopik, kompleksitas struktur beton mulai tampak. itu awal yang jelas dari dua bagian dari struktur tidak didistribusikan secara merata antara satu dan lainnya, maupun mereka sendiri. Selanjutnya pada beberapa bagian massa hcp tampak kerapatan agregat satu dengan yang lain pada kondisi porositas besar seperti pada Gambar 4. Pada pembesaran 200 kali pada Gambar 4(a) struktur pasta semen tampak tidak homogen, pada beberapa bagian yang tampak tebal dengan pori-pori yang banyak. Pada Gambar 4(b) dan 4(c) dibesarkan daerah pori tersebut pada pasta semen yang sama, maka tampak kristal Kalsium Hidroksida, dan yang panjang-panjang seperti jarum yang panjang adalah *ittringite*, dan pengumpulan dari serat-serat kecil kristal Kalsium Hidroksida. Apabila beberapa benda uji dari kandungan semen pada beton diantaranya sama, tetapi berbeda pada jumlah air yang diuji pada interval waktu yang bervariasi, maka dapat dilihat secara umum, bahwa volume kapiler pori-pori pada hcp akan dikurangi dengan pengurangan rasio air dan semen atau dengan penambahan umur hidratisasi. Untuk

pasta semen hidratisasi baik, distribusi tidak homogen dari butiran dan pori-pori sendiri mungkin dapat diabaikan ketika memodelkan perilaku material. Studi tentang mikrostruktur memeperlihatkan bahwa hcp sekarang ini tidak dapat dilakukan pada beton. Pada penampakan agregat dari struktur hcp pada partikel agregat yang besar, selalu sangat berbeda dari struktur dari spesi pada sistem. Kenyataannya beberapa aspek dari perilaku beton di bawah tekanan dapat diterangkan hanya ketika permukaan antara agregat dalam spesi diperlakukan pada fase ketiga dari struktur beton. Hal ini merupakan keunikan dan keistimewaan dari struktur beton yang dapat



Gambar 4. Mikrostruktur dari Pasta Semen

Daerah peralihan mewakili *interfacial region* di antara partikel-partikel butiran agregat dan pasta semen. Keadaan awal dari lapisan tipis antara 10 μm sampai dengan 50 μm mengelilingi agregat kasar, daerah perpindahan umumnya lemah merupakan salah satu dua komponen dari beton. Ketiga fase sendiri adalah multi fase secara alami. Sebagai contoh, beberapa partikel agregat mengandung beberapa mineral, pada kondisinya dalam retak mikro dan pori-pori. Hal serupa, di antara pasta semen dan daerah perubahan umumnya mengandung distribusi yang heterogen dari jenis yang

berbeda dan sejumlah fase padat, pori-pori dan retak mikro yang akan digambarkan di bawah. Ketiga, yang tidak disukai dalam bidang material, bahwa struktur beton tidak stabil, dalam hal ini pada hakekatnya tidak mempunyai karakteristik yang tetap pada bahan. Karena dua komponen dari struktur—pasta semen dan daerah peralihan—subyek perubahan dengan waktu, kelembaban lingkungan dan temperatur.

Pada heterogenitas yang tinggi dan gaya dinamik alami dari struktur beton, sebagai alasan utama kenapa teori struktur yang memiliki hubungan dengan model, secara umum bermanfaat untuk memperkirakan perilaku dari mineral, dimana jarang digunakan dalam kasus beton. Suatu pengetahuan yang luas tentang hal-hal yang istimewa dari masing-masing komponen struktur beton, dengan pemahaman beton sebagai bahan komposit. Definisi XRF adalah alat yang digunakan untuk menganalisa kandungan unsur dalam bahan yang menggunakan metode spektrometri. Alat ini mempunyai keunggulan analisis yaitu lebih sederhana dan lebih cepat dibanding analisis dengan alat lain. Alat XRF merupakan alat uji tak merusak yang mampu menentukan kandungan unsur dalam suatu bahan padat maupun serbuk secara kualitatif dan kuantitatif dalam waktu yang relatif singkat. XRF merupakan pemancaran sinar X dari atom tereksitasi yang dihasilkan oleh tumbukan elektron berenergi tinggi, partikel-partikel lain, atau suatu berkas utama dari sinar X lain. Fluoresensi sinar X digunakan pada beberapa teknik seperti pada mikroanalisis dengan *kuart* elektron.

Prinsip analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-X karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek foto listrik. Efek foto listrik terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-X), bila energi sinar tersebut lebih tinggi dari pada energi ikat elektron dalam orbit K, L, atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar dari orbitnya. Dengan demikian atom target akan mengalami kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh

elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-X. Sinar-X yang dihasilkan merupakan gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang berasal dari bahan sasaran yang tertumbuk elektron. Jenis spektrum *discreet* yang terjadi tergantung pada perpindahan elektron yang terjadi dalam atom bahan. Spektrum ini dikenal dengan spektrum sinar-X karakteristik. Spektrometri XRF memanfaatkan sinar-X yang dipancarkan oleh bahan yang selanjutnya ditangkap detektor untuk dianalisa kandungan unsur dalam bahan. Bahan yang dianalisis dapat berupa padat massif, pelat, maupun serbuk. Analisis unsur dilakukan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif menganalisis jenis unsur yang terkandung dalam bahan dan analisis kuantitatif dilakukan untuk menentukan konsentrasi unsur dalam bahan. Sinar-X yang dihasilkan dari peristiwa seperti peristiwa tersebut diatas ditangkap oleh detektor semi konduktor Silikon Litium (SiLi). Detektor tersebut dapat berfungsi dengan baik bila temperatur dijaga pada kondisi suhu di bawah 0°C (-115°C) dengan cara merendamnya dalam Nitrogen cair.

Analisa menggunakan alat XRF mempunyai keunggulan analisa yang cepat dan tidak memerlukan preparasi yang rumit. Waktu yang dipergunakan untuk satu kali pengukuran selama 300 detik (5 menit). Sedangkan preparasi sampel tidak perlu dilakukan dengan uji merusak, sehingga sampel dapat segera diukur.



Gambar 5. Alat Uji XRF Minipal 4

METODE

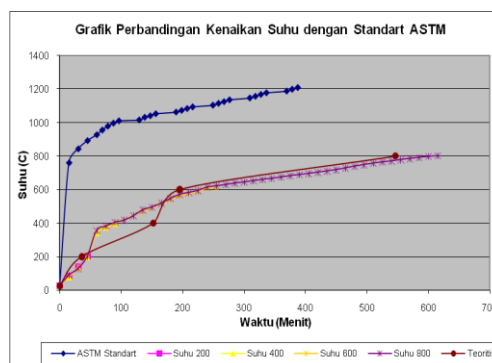
1. Pembuatan benda uji berdasarkan pada Peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) dengan spesifikasi beton sesuai dengan standart beton struktural.
2. Pembakaran benda uji:
 - Dilakukan pada umur beton telah melewati umur 28 hari.
 - Alat: oven pembakaran keramik Dinoyo dengan dimensi 2x1,5x1,5 meter³ 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 dibagian belakang, panas maksimum 1000°C dan dilengkapi dengan termokopel sebagai pengontrol suhu ruangan *burner*.
 - Pembakaran benda uji dilakukan dengan variasi suhu yaitu 200°C, 400°C, 600°C, hingga 800°C.
3. Perlakuan pendinginan benda uji:
 - Cara penyiraman: setelah benda uji dikeluarkan dari tungku pembakaran kemudian diberi perlakuan penyiraman selama 1 jam.
 - Cara normal (biasa): setelah benda uji dikeluarkan dari tungku pembakaran lalu diberi perlakuan pendinginan tanpa adanya penyiraman pada suhu ruang 27°C selama 1 jam.
4. Pengujian *X-Ray Fluorescence* terhadap beton yang telah ditumbuk menjadi serbuk dengan alat uji *X-Ray Fluorescence* Minipal 4. Dengan bentuk benda uji berupa serbuk beton yang sudah mengalami perubahan suhu masing-masing.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembakaran Benda Uji

Benda uji berupa silinder beton mengalami pembakaran dengan suhu yang bervariasi pada tungku pembakar sebelum dilakukan *X-Ray Fluorescence*. Dimana durasi pemanasan untuk masing-masing suhu mengalami perbedaan sampai pada

suhu target. Seperti dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Perubahan Suhu Standart, Penelitian dan Teoritis

Berdasarkan Gambar 6 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 dimana untuk mencapai suhu ±800°C pembakaran berdasarkan suhu standart ASTM, hanya membutuhkan waktu ±30 menit atau 0,5 jam. Sedangkan berdasarkan hasil penelitian dibutuhkan waktu lebih lama, yaitu ±615 menit atau 8 jam 55 menit. 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.

Perubahan Fisik Beton

Tabel 2. Perubahan Warna

Suhu	Perubahan Warna
200° C	Abu-abu keputihan
400° C	Coklat
600° C	Coklat susu dengan bintik-bintik merah tua
800° C	Putih

Tabel 3. Kerusakan pada Beton

Cara Pendinginan	Suhu	Kerusakan Yang Terjadi
Biasa	200° C	Tidak terjadi kerusakan yang jelas pada beton
	400° C	Tampak terlihat retak-retak rambut, sedikit pori
	600° C	Retak terkelupas
	800° C	Retak, retak rambut, terkelupas
Disiram	200° C	Retak rambut
	400° C	Retak rambut, retak besar
	600° C	Terkelupas
	800° C	Retak, rapuh, terkelupas dan ada bagian yang pecah (<i>spalling</i>)

Tabel 4. Kuat Tekan Beton Terhadap Pendinginan Disiram dan Tidak Disiram.

Cara Pendinginan	Suhu	Sampel	Kuat Tekan (MPa)
-	Suhu Kamar (Tidak Dibakar)	1	21.931201
		2	20.542737
		3	17.314106
Disiram	200° C	1	16.159832
		2	12.119874
		3	11.542737
	400° C	1	7.791348
		2	7.502779
		3	8.079916
	600° C	1	2.308547
		2	3.462821
		3	2.885684
	800° C	1	2.308547
		2	2.019979
		3	2.597116
Biasa	200° C	1	20.776927
		2	17.891243
		3	12.697011
	400° C	1	9.234190
		2	6.925642
		3	8.079916
	600° C	1	-
		2	3.462821
		3	4.617095
	800° C	1	2.885684
		2	2.308547
		3	3.751390

Terjadi perubahan warna pada beton setelah mengalami pembakaran di setiap suhu yaitu pada suhu 200°C warna beton berubah menjadi abu-abu keputihan, suhu 400°C warna beton menjadi coklat, suhu 600°C warna beton menjadi coklat susu dengan bintik-bintik merah tua dan suhu 800°C warna beton menjadi putih dan pada tiap suhu pembakaran, beton mengalami kerusakan yang berbeda-beda seperti retak rambut, terkelupas, rapuh, pecah dan muncul pori.

Dari hasil pengujian kuat tekan beton terhadap perlakuan pendinginan dengan cara disiram akan mengalami penurunan kekuatan lebih besar dibandingkan dengan beton yang diberi perlakuan tidak disiram. Namun perbedaan antara kedua perlakuan pendinginan tidak terlalu besar.

Analisa Hasil Pengujian X-Ray Fluorescence

Dari hasil pengujian X-Ray Fluorescence dengan pengujian serbuk beton didapat unsur-unsur dominan yang terdapat di dalam beton diantaranya:

- a. Unsur Kalsium (Ca)
- b. Unsur Ferrum (Fe)
- c. Unsur Silika (Si)
- d. Unsur Aluminium (Al)

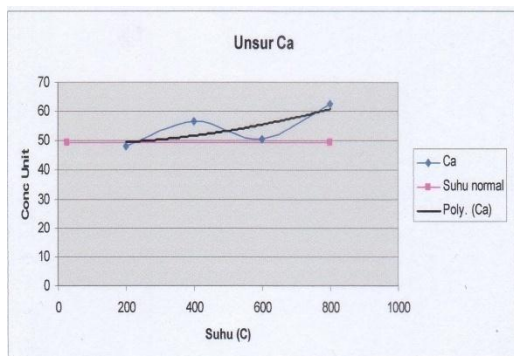
Secara rinci unsur-unsur yang didapat pada serbuk beton dengan perubahan suhu dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Analisa X-Ray Fluorescence

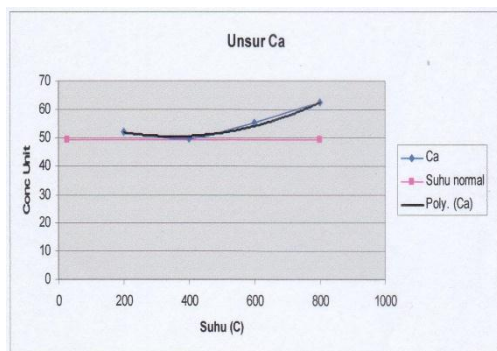
Compound	Beton Normal	Disiram				Tidak Disiram			
		200	400	600	800	200	400	600	800
	(%)	Conc unit (%)				Conc unit (%)			
Al	6,40	6,7	5,3	6,8	4,6	5,9	6,5	5,6	4,7
Si	17,90	19,2	16	19,1	14,3	16,5	18,6	16,3	14,2
S	0,99	0,94	1,17	1	1,17	1	1,08	1,15	1,24
K	0,71	0,85	0,41	0,68	0,26	0,55	0,72	0,56	0,27
Ca	49,34	47,94	56,61	50,58	62,43	52,25	49,8	55,09	62,26
Ti	1,33	1,43	0,965	1,23	0,77	1,22	1,33	1,13	0,822
V	0,08	0,09	0,056	0,075	0,05	0,077	0,09	0,081	0,046
Cr	0,06	0,062	0,056	0,059	0,048	0,063	0,062	0,059	0,048
Mn	0,34	0,34	0,28	0,31	0,23	0,33	0,32	0,3	0,22
Fe	20,00	20	16	17,6	13,1	19,2	18,9	17,1	13,3
Ni	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-
Cu	0,13	0,14	0,12	0,12	0,11	0,13	0,13	0,12	0,11
Zn	0	0,02	0,009	0,01	0,01	-	-	0,01	0,02
Sr	0,24	0,25	0,21	0,22	0,2	0,24	0,24	0,23	0,19
Zr	0,06	0,064	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,06	0,05
In	1,70	1,5	2	1,8	2	1,7	1,8	1,8	2,2
Ba	0,20	-	0,2	-	0,1	-	-	-	-
Eu	0,20	0,2	0,1	0,1	0,06	0,2	0,2	0,1	0,08
Yb	-	-	0,12	-	0,15	0,094	-	0,09	0,14
Re	0,25	0,2	0,22	0,2	0,19	0,23	0,28	0,21	0,17
Au	0,11	-	0,087	-	0,08	0,099	-	-	-
Hg	0,05	0,08	0,04	0,06	0,04	0,05	-	0,07	0,04

Hasil X-Ray Fluorescence dapat dilihat pada Gambar 7-14.

Unsur Kalsium (Ca)



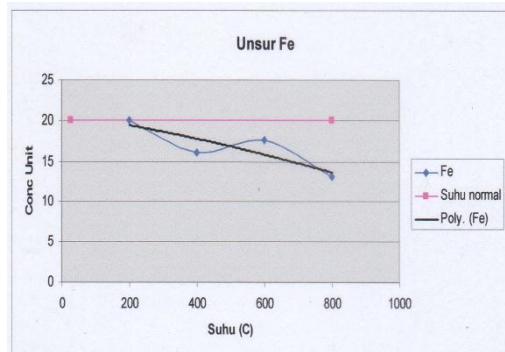
Gambar 7. Beton Disiram



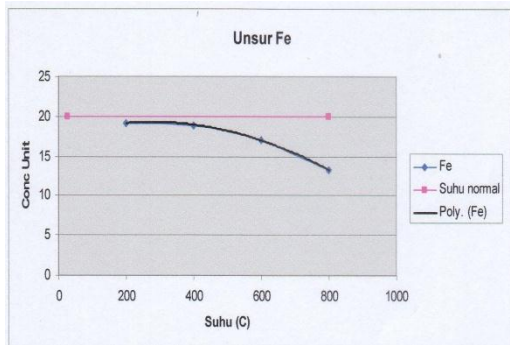
Gambar 8. Beton Tanpa Disiram

Unsur Kalsium adalah unsur terbanyak dari keseluruhan unsur-unsur yang ada di dalam beton. Pada beton yang tidak disiram semakin tinggi suhu maka nilainya semakin tinggi. Sedangkan pada beton yang tidak disiram akan turun pada suhu 600°C dan meningkat kembali pada suhu di atas 600°C. Hal ini karena ikatan senyawa kimia yang terjadi pada masing masing suhu tidak sama. Terjadi penguraian senyawa yang ada menjadi unsur-unsur penyusunnya.

Unsur Ferrum (Fe)



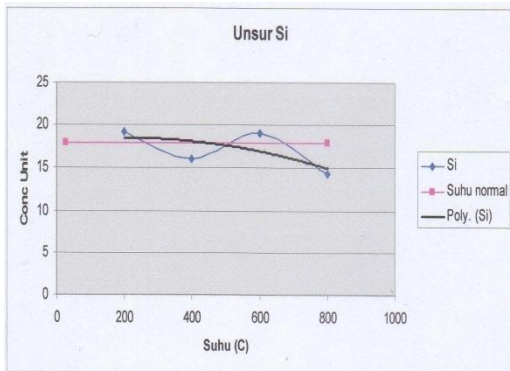
Gambar 9. Beton Disiram



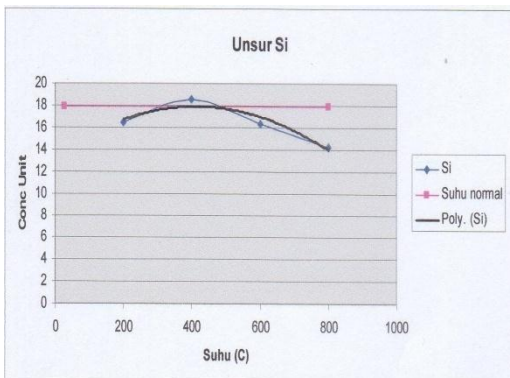
Gambar 10. Beton Tanpa Disiram

Unsur Ferrum adalah unsur terbanyak ke-2 dari keseluruhan unsur-unsur yang ada di dalam beton. Berbeda dengan Kalsium, unsur Ferrum akan semakin turun persentasenya seiring dengan naiknya temperatur baik pada beton disiram maupun tidak disiram. Walaupun sedikit terjadi kenaikan prosentase pada suhu 400°C pada beton disiram. Tetapi kemudian terjadi kembali penurunan kandungan Ferrum pada beton.

Unsur Silika (Si)



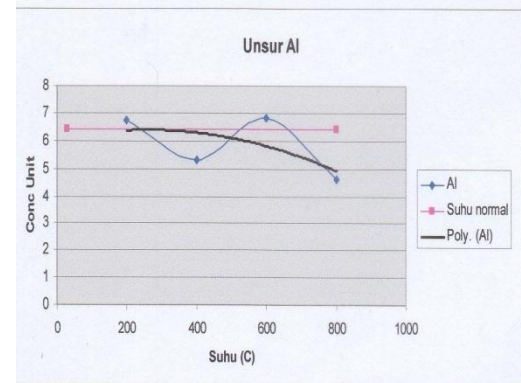
Gambar 11. Beton Disiram



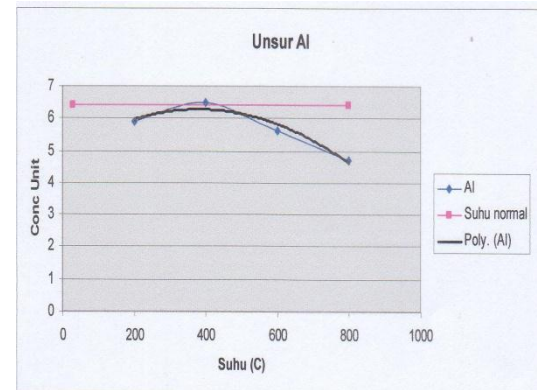
Gambar 12. Beton Tanpa Disiram

Unsur Silika adalah unsur terbanyak ke-3 dari keseluruhan unsur-unsur yang ada di dalam beton. Kecenderungan prosentase kadar Silika pada beton pasca bakar dengan penyiraman atau tanpa penyiraman hampir sama dengan unsur Ferrum. Yaitu semakin menurun seiring dengan kenaikan temperatur. Walaupun juga terjadi kenaikan prosentase silika juga hingga suhu 400°C pada beton yang disiram, tetapi akan kembali mengalami penurunan prosentase pada suhu di atas 400°C. Seperti yang juga terjadi pada unsur Ferrum.

Unsur Aluminium (Al)



Gambar 13. Beton Disiram



Gambar 14. Beton Tanpa Disiram

Unsur Aluminium adalah unsur terbanyak ke-4 dari keseluruhan unsur-unsur yang ada di dalam beton. Dari hasil *X-Ray Fluorescence* terlihat bahwa dengan semakin tingginya suhu maka kandungan unsur aluminium juga semakin menurun baik pada beton yang disiram maupun yang tidak disiram.

Setelah beton tersebut dibakar, terdapat kecenderungan bahwa unsur

Kalsium mengalami peningkatan dalam hal prosentase baik beton yang diberi perlakuan penyiraman maupun yang tidak disiram. Sedangkan unsur Ferrum, Silika, dan Aluminium mengalami penurunan baik beton yang diberi perlakuan penyiraman maupun yang tidak disiram. Hal ini dimungkinkan pada suhu tinggi unsur-unsur tersebut bereaksi atau mengalami pelepasan serta pengikatan dengan unsur-unsur lainnya.

Pada hasil *X-Ray Fluorescence* terdapat berbagai unsur penyusun beton, tetapi yang dominan terutama yang menentukan kekuatan beton hanyalah 4 unsur terbesar tersebut. Sedangkan untuk unsur yang lain tidak dominan dalam menentukan kekuatan beton. Tetapi kecenderungan kandungan unsur-unsur tersebut adalah identik yaitu semakin menurun kandungannya dengan meningkatnya temperatur beton. Walaupun juga ada yang mengalami peningkatan seperti Sulfur, Zink, dan beberapa unsur yang lain dimana keberadaannya semakin menurunkan kekuatan beton. Berlawanan dengan keempat unsur terbesar lainnya yang semakin menurun kandungannya akan semakin menurunkan kekuatan beton.

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian *X-Ray Fluorescence* terlihat bahwa setelah beton mengalami perubahan temperatur maka akan terjadi perubahan susunan unsur kimia dalam beton. Sebagian besar unsur penyusun dan penentu kekuatan beton mengalami penurunan dan hal ini seiring dengan menurunnya kekuatan beton seiring kenaikan temperatur. Sedangkan untuk unsur yang lain mengalami hal yang serupa. Unsur Yb dan Zn muncul pada beton dibakar dengan penyiraman dan tanpa penyiraman serta unsur Ni muncul pada beton dibakar tanpa penyiraman. Unsur Ba dan Au hilang pada beton dibakar dengan penyiraman dan tanpa penyiraman serta unsur Hg hilang pada beton dibakar tanpa penyiraman.

Disamping dari hasil data di atas perlu melakukan peninjauan yang lebih mendalam

terhadap senyawa kimia yang terbentuk sebelum dan setelah proses pembakaran benda uji karena dari penelitian ini dengan menggunakan uji XRF hanya dapat diketahui unsur kimiawinya saja dan bukan senyawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Addleson, L., 1976, *Heat and Fire and Their Effects*, Vol. 4, Material for Building, Newnes-Butterworths.
- Hansen, T.C., 1976, *Text Book on Concrete Technology*, Directorate of Building Research, Bandung.
- Malhotra, H.L., 1982, *Design of Fire-Resisting Structures*, Surrey University Press, New York.
- Mehta, K.M dan Monteiro, P.J.M., 1993, *Concrete, Structure, Properties and Materials*, Second Editon, Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mulyono, T., 2004, *Teknologi Beton*, Andi, Yogyakarta.
- Munaf dan Siahaan, *Diagnosa dan Perbaikan Untuk Peningkatan Kinerja Struktur Beton*, Concrete Repair & Maintenance, 2003.
- Partowiyatmo, A., 1996, *Efek Kebakaran pada Konstruksi Beton Bertulang*, Majalah Konstruksi, Februari, Jakarta.
- Rokhman, A., 2006, *Gedung Pasca Bakar Estimasi Kekuatan Sisa dan Teknologi Perbaikan*, *Jurnal Dinamika TEKNIK SIPIL*, (Volume 6, Nomor 2, hal. 95).
- Rudiatmanto, S., 2006, *Pengaruh Suhu Tinggi Terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Beton*, Tesis Program Studi Teknik Sipil-Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya, Malang.
- SNI 03-2834-2002, 2002, *Tatacara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*, BSN, Indonesia.
- Sumardi, *Aspek Kimia Beton Pasca Bakar*, Kursus Singkat Evaluasi Dan Penanganan Struktur Beton Yang Rusak Akibat Kebakaran dan Gempa, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik UGM Yogyakarta, 24-25 Maret 2000.