

PENGARUH TEMPERATUR TINGGI TERHADAP KEKUATAN LELEH DAN KUAT TARIK PADA BAHAN BAJA MELALUI UJI KETAHANAN API (Impact of Fire Temperature to the Yield and Tensile Strength of Steel Structure)

¹Teguh Esa Wibawa dan ²Suprpto

¹ Alumni Program Pasca Sarjana, Fakultas Teknik, Jurusan Sipil, Bidang Keahlian Struktur
Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, Jawa-Timur
Email : teguh_struktur@yahoo.com

² Pusat Litbang Permukiman
Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan, Kabupaten Bandung 40393
Email : suprpto@puskim.pu.go.id

Diterima : 19 Mei 2011; Disetujui : 19 Juli 2011

Abstrak

Baja mempunyai beberapa keunggulan di bandingkan bahan konstruksi lainnya, misalnya dalam masalah daktilitas dan pengerjaan yang relatif lebih cepat dibandingkan penggunaan beton bertulang. Namun baja mempunyai beberapa kelemahan di antaranya adalah rentan terhadap perubahan temperatur. Bila suatu struktur baja mengalami kebakaran, kekuatan struktur baja akan menurun sehingga mempengaruhi fungsi struktur baja tersebut. Beberapa metode telah dikembangkan untuk melindungi elemen baja dari pengaruh kebakaran, di antaranya adalah encasement method dimana bahan yang biasa digunakan adalah gypsum board. Penelitian ini bertujuan untuk dapat mengetahui sifat-sifat mekanikal profil baja yang dilapisi gypsum board pasca pengujian pembakaran. Sifat-sifat mekanikal yang dianalisis adalah kurva hubungan tegangan- regangan, kurva kuat tarik yang tersisa, tegangan ultimate, waktu kritis, dan temperatur kritis dari profil baja setelah mengalami kebakaran. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental. Pengujian yang akan dilakukan meliputi pengujian pembakaran dan pengujian kuat tarik. Benda uji yang akan dipakai adalah baja karbon A36 sebanyak 4 buah. Pengujian pembakaran dilakukan terhadap benda uji tanpa lapisan, dan benda uji dilapisi gypsum board 12 mm dan 24 mm. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan baja yang tanpa mengalami pengujian pembakaran. Profil baja yang di lapis gypsum board dengan variasi ketebalan 12 mm dan 24 mm mempunyai perbedaan yang signifikan terhadap kenaikan temperatur pada saat mengalami kebakaran. Untuk mencapai temperatur ± 540 °C, baja yang tidak di lapis oleh gypsum board memerlukan waktu 8 menit, sedang baja yang di lapis 12 mm memerlukan waktu 32 menit dan baja yang di lapis 24 mm memerlukan waktu 52 menit. Tegangan tarik dan tegangan ultimate pada profil baja yang dilapisi atau tidak dilapisi dengan pelindung gypsum board setelah baja mengalami proses pendinginan pada udara terbuka tidak mempunyai perbedaan yang signifikan. Kekuatan baja karbon yang mengalami pendinginan secara normal akan kembali mendekati kekuatan awalnya.

Kata Kunci : Temperatur, gypsum board, sifat mekanikal

Abstract

Steel has several advantages compared to other construction materials such as its ductility and relatively faster in the construction work than reinforced concrete. However, there are several weaknesses of steel particularly against temperature changes. When steel exposed to fire, its structural strength will decrease which clearly influence its function. Several methods have been developed for protecting steel elements against high temperature such as an encasement method where the material commonly used is gypsum board. This research aims at investigating the mechanical properties of steel encased by gypsum board after fire exposure. Analysis was done on the correlation curve of stress, strain, remained tensile strength curve, ultimate strength, critical time and the critical temperature of steel profile after burned. This is an experimental research where the tests conducted were burning test and tensile strength test. The samples used were 4 (four) carbon steel A36. Test conducted to uncover samples, and samples covered by 12mm and 24 mm gypsum boards. The results was then compared to the untested steel. The steel which was covered by 12 and 24 mm gypsum board shown a signifikan differences in temperature increase when exposed to fire. To reach a temperature of ± 540 °C, the uncovered steel required 8 minutes, whereas 12 mm covered steel required 32 minutes, and 24 mm covered steel required 52 minutes. The tensile and ultimate strength of the uncovered and covered steel, after normalizing cooling processes did not show a signifikan differences. Carbon steel experience the normal cooling will recover its initial strength.

Keywords : Temperature, gypsum board, mechanical properties

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan material baja sebagai elemen struktur pada bangunan-bangunan tinggi saat ini semakin banyak digunakan. Baja mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan bahan konstruksi lainnya, diantaranya dalam masalah daktilitas dan waktu pengerjaannya. Baja mempunyai daktilitas yang lebih baik dan waktu pengerjaan yang relatif lebih cepat dibandingkan dengan beton bertulang. Namun, selain beberapa keunggulan tersebut, baja juga mempunyai beberapa kelemahan, diantaranya adalah rentan terhadap perubahan temperatur. Apabila sebuah material baja mengalami kenaikan temperatur, misalnya terkena api secara langsung maka kekuatan leleh dan tarik dari material baja tersebut akan mengalami penurunan secara drastis [10]. Hal ini dapat menyebabkan fungsi material baja tersebut sebagai elemen struktur akan berubah.

Pada sebuah penelitian, temperatur yang dapat dicapai pada saat kebakaran terjadi ± 1.000 °C [11]. Ketika sebuah material baja mengalami kenaikan temperatur sampai dengan atau melebihi 704 °C maka kekuatan leleh dan kekuatan tarik dari material tersebut akan mengalami penurunan secara drastis [3]. Proses kenaikan temperatur pada saat kebakaran dapat menyebabkan material baja mengalami perubahan, baik secara fisik, kekuatan, perilaku dan struktur kimia pembentuknya. Hal ini jelas dapat mempengaruhi kinerja dari material baja tersebut yang berfungsi sebagai salah satu elemen struktur. Oleh karena itu perlindungan material baja dari bahaya kebakaran sangat diperlukan mengingat mahalnya harga material baja pada saat ini.

Pada kasus pasca kebakaran biasanya hanya menyisakan kerangka strukturnya saja, sehingga untuk mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh kebakaran maka perlu dilakukan perlindungan khusus terhadap baja tersebut dengan bahan pelindung tahan api.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk melindungi baja dari bahaya kebakaran, diantaranya adalah *encasement methode*. Pada metode ini, baja yang digunakan sebagai elemen struktur diselubungi atau dibungkus dengan menggunakan bahan yang tahan api, salah satunya adalah *gypsum board* [3]. Baja yang dilindungi, dengan demikian dapat digunakan sebagai elemen sistem proteksi pasif [17].

Penelitian tentang pengaruh penggunaan *gypsum board* 12 mm sebagai *fire shield* pernah dilakukan oleh P.T Knauf pada tahun 2010 [8]. Pengujian meliputi stabilitas, integritas dan insulasi. Hasil dari pengujian tersebut adalah -/50/50, artinya stabilitas tidak dipersyaratkan dalam komponen

struktur. Integritas, tidak terjadi retak tembus asap/ api dalam waktu 50 menit. Insulasi, kenaikan temperatur maksimum pada sisi yang tidak terkena api secara langsung tidak lebih dari 180 °C dalam waktu 50 menit [8].

TUJUAN PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dibahas pengaruh penggunaan *gypsum board* pada material baja yang terkena kebakaran sebagai *fire retardant*. Dengan melakukan serangkaian analisis dan pengujian laboratorium sehingga didapat korelasi antara temperatur dan pola serta perilaku inelastis pada struktur baja tersebut. Pola dan perilaku inelastis tersebut meliputi hubungan tegangan dan regangan, kuat tarik dan tegangan leleh.

KAJIAN TEORITIS

Baja dibentuk dari bahan logam dengan komposisi besi sebanyak 95% atau lebih. Untuk mendapatkan sifat dan karakteristik dari suatu material yang diinginkan, maka dapat ditambahkan atau dicampur dengan bahan-bahan yang lainnya. Bahan-bahan yang terkandung didalam suatu material baja sangat mempengaruhi sifat, karakteristik dan perilakunya. Beberapa bahan yang dapat merubah sifat suatu material baja adalah sebagai berikut :

1. *Karbon*, unsur karbon yang terkandung akan mempengaruhi perilaku dari material baja tersebut. Semakin banyak jumlah karbon yang terkandung maka kekuatan, kekerasan dan abrasi dari material baja tersebut juga akan meningkat, akan tetapi hal ini dapat menyebabkan daktilitasnya menurun. Oleh karena itu pada baja karbon dibatasi antara 0,15% - 1,7%.
2. *Mangan*, pada prinsipnya sifat yang terkandung pada unsur mangan sama seperti unsur karbon. Unsur mangan juga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan akan tetapi dapat menyebabkan daktilitas dari material baja tersebut menjadi menurun.
3. *Silikon*, unsur silikon ditambahkan dengan tujuan agar dapat menyebabkan terjadinya proses deoksidasi pada pembuatan baja. Sehingga dengan melalui proses tersebut, oksigen yang berada pada senyawa-senyawa yang lain dapat diangkat atau dihilangkan. Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan kekerasan dari material baja tersebut [9].

Sebagai elemen struktur baja dapat dibedakan menjadi tiga golongan berdasarkan kekuatan dan kandungan kimianya, yaitu :

1. Baja karbon rendah
2. Baja paduan rendah berkekuatan tinggi
3. Baja paduan [6]

Baja karbon adalah sebutan untuk baja yang mengandung unsur yang bukan besi dengan persentase maksimal adalah sebagai berikut :

1. Karbon (maksimum 1,7%)
2. Mangan (maksimum 1,65%)
3. Silikon (maksimum 0,60%)
4. Tembaga (maksimum 0,60%) [13].

Karbon dan mangan ditambahkan untuk mendapatkan kekuatan dari baja akan tetapi dalam jumlah yang berlebihan dapat menyebabkan keteguhan, kemampuan las dan daktilitasnya berkurang [9].

Perilaku Baja pada Temperatur Tinggi

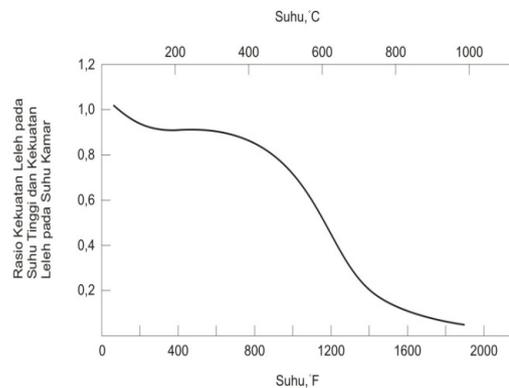
Temperatur yang tinggi pada material baja akan sangat berpengaruh terhadap sifat dan karakteristiknya. Oleh karena itu pengetahuan tentang perubahan perilaku ini diperlukan dalam menentukan prosedur pengelasan dan pengaruh kebakaran. Apabila suatu material baja diberikan temperatur melebihi 200°F (93°C) maka kurva tegangan-regangan mulai menjadi tidak linier yang kemudian secara bertahap titik leleh yang jelas menghilang. Pada temperatur antara 800°F sampai dengan 1.000°F (430°C sampai dengan 540°C) akan terjadi laju penurunan yang maksimum. Modulus elastisitas, kekuatan leleh dan kekuatan tarik akan menurun apabila temperatur semakin tinggi [17].

Pola dan perubahan perilaku dari suatu material baja yang mengalami kenaikan temperatur akan berbeda antara satu dengan yang lainnya. Hal ini diakibatkan karena kandungan dan mikrostruktur pembentuknya saling berlainan, akan tetapi pengaruh kenaikan temperatur secara umum dapat dilihat pada gambar 1. Pada saat suatu material baja menerima panas dengan temperatur mencapai 700°F (370°C), tegangan leleh dan kekuatan tariknya akan menurun. Pada saat mengalami kenaikan temperatur, baja paduan dengan kekuatan tinggi akan mengalami penurunan tegangan batas (F_u) lebih cepat dibandingkan dengan baja karbon. Pada proses pendinginan, kekuatan dari baja karbon hampir mendekati kekuatan awalnya. Baja paduan dengan kekuatan tinggi akan mengalami penurunan kekuatan batas yang permanen ketika temperatur telah berkisar antara 300°C sampai dengan 400°C [12]. Baja dengan persentase karbon yang tinggi seperti baja A36, menunjukkan pelapukan regangan (*strain aging*) pada temperatur 300°F sampai dengan 700°F (150°C sampai dengan 370°C). Hal ini dapat dilihat dari kenaikan relatif titik leleh dan kekuatan tarik pada daerah temperatur tersebut. Apabila temperatur telah

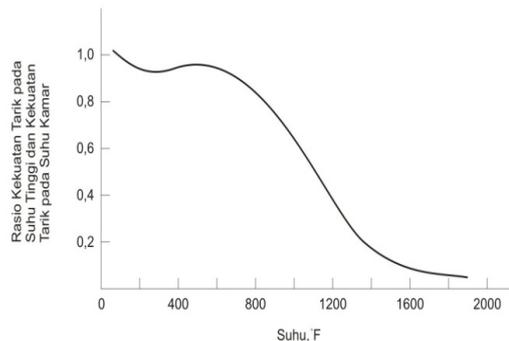
mencapai 500°F sampai dengan 600°F (260°C sampai 320°C) maka kekuatan tariknya akan naik kira-kira sebesar 10% diatas kekuatan pada temperatur ruang dan titik leleh akan kembali mendekati titik leleh pada temperatur ruang. Pelapukan regangan yang terjadi dapat mengakibatkan juga daktilitas dari material baja tersebut menjadi menurun[17]

Pada temperatur 600°F sampai dengan 800°F (320°C sampai dengan 430°C) akan menyebabkan formasi struktur yang getas. Apabila pemanasan dilakukan terus menerus sampai melewati 1.000°F (540°C) senyawa karbon dan elemen paduannya akan mengendap, hal ini akan menyebabkan mikrostrukturnya menjadi lebih getas [13]. Pada saat material baja menerima kenaikan temperatur sampai dengan 700 °C maka tegangan leleh dan kuat tariknya akan menurun berbanding lurus dengan kenaikan temperatur yang diterimanya. Tegangan leleh berkisar 60% sampai dengan 70% ketika temperatur yang diterima material baja tersebut telah melewati 1.000°F (540°C).

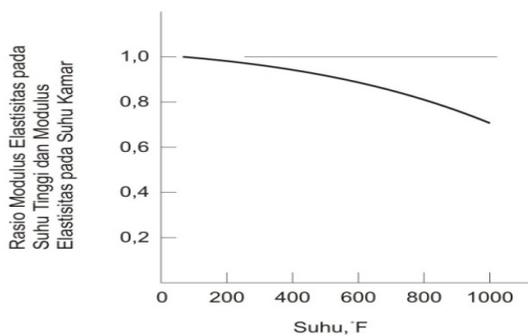
Untuk menjaga kualitas material baja pasca kebakaran maka baja tersebut harus dilapisi oleh suatu bahan yang bersifat tahan terhadap temperatur yang tinggi. Semua prosedur dan metode untuk pengujian terhadap material yang tahan api telah diatur pada ASTM E119 [9].



Gambar 1.a Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Leleh secara Umum [12]



Gambar 1.b Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Leleh secara Umum [12]



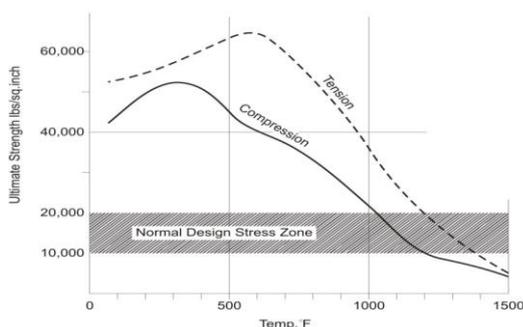
Gambar 1.c Pengaruh Temperatur terhadap Modulus Elastisitas secara Umum [12]

Apabila suatu material baja yang tidak dilindungi dengan suatu *fire retardant* maka baja tersebut akan mengalami peningkatan temperatur yang sangat cepat, karena sifat baja yang merupakan suatu konduktor yang baik [4].

Pada saat kebakaran, temperatur 1.000°F (540°C) atau lebih akan mudah tercapai dengan cepat. Ketika temperatur 1.000°F (540°C) atau lebih telah tercapai maka akan menyebabkan kekuatan dari material baja tersebut menurun dengan sangat cepat. Keruntuhan terjadi pada saat temperatur mencapai 1.000 °F [14].

Berdasarkan hal ini, ASTM E 119 menentukan bahwa untuk pengujian standar test kebakaran adalah tercapainya temperatur 1.000 °F dalam waktu 5 menit [2].

Untuk pengujian standar kebakaran pada kolom-kolom baja, pengujian akan dihentikan apabila ketika salah satu kolom tersebut telah mencapai temperatur 12.000F (648°C) atau temperatur rata-rata pada setiap kolom 1.000°F (540°C). Pola keruntuhan ditunjukkan seperti pada gambar 2 [3].



Gambar 2 Pola Keruntuhan pada Baja [3]

Gypsum Board

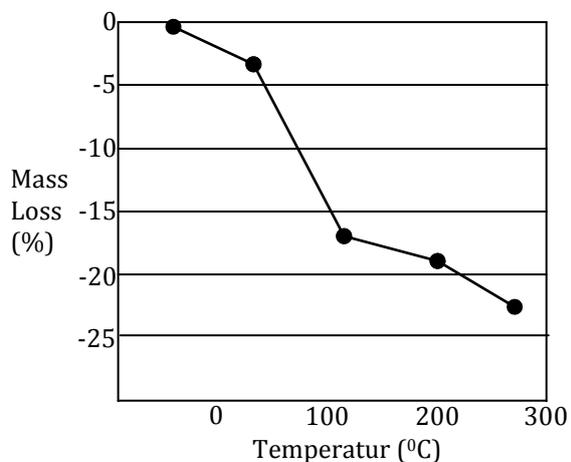
Gypsum board merupakan material yang baik dalam penyerapan panas [3]. *Gypsum board* merupakan salah satu bahan material yang bisa digunakan dalam penggunaan *encasement methode*. Keuntungan secara fisik dari *gypsum board* dibandingkan bahan material lain diantaranya adalah :

1. Lebih ringan
2. Mudah dikerjakan/ dalam pembentukan
3. Ketebalan yang bervariasi, sehingga memungkinkan untuk dapat memilih ketebalan yang ideal.

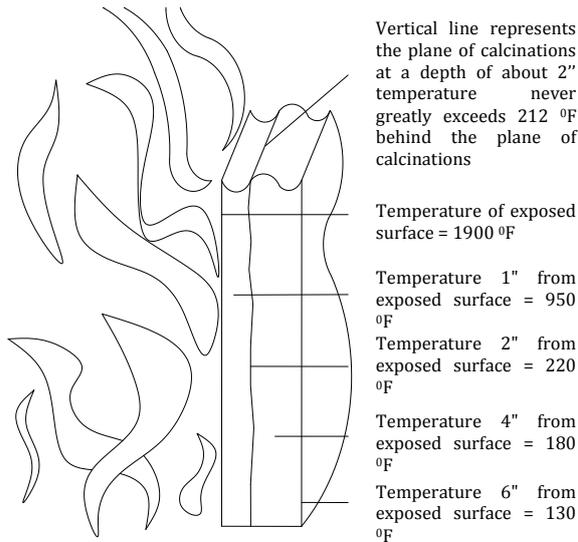
Gypsum board sering digunakan sebagai pelindung konstruksi dari bahaya api atau kebakaran. Tingkat ketahanan api yang dapat dicapai oleh *gypsum board* berasal dari susunan senyawa-senyawa pembentuk yang terdiri dari kalsium sulfat dan biasa disebut dengan *crystalline*. *Crystals* ini mengandung kurang lebih 50% air, sehingga mengakibatkan *gypsum board* sangat efektif digunakan sebagai *fire retardant*.

Pada saat terjadi kenaikan temperatur atau mengalami kebakaran, maka temperatur *gypsum board* akan naik secara perlahan. Kenaikkan temperatur yang terjadi akan berhenti dan menjadi stabil apabila temperatur *gypsum board* telah mencapai kurang lebih temperatur titik didih air (100 °C). Hal ini juga menyebabkan kandungan air yang terdapat dalam *crystalline* akan menguap. Proses penguapan ini biasa disebut dengan istilah *calcination*.

Selama terjadinya kenaikan temperatur atau kebakaran akan terjadi perubahan struktur *crystalline* yang berada dalam *gypsum board*. Perubahan ini mengakibatkan kepadatan struktur dan masa akan berkurang. Pada saat temperatur mencapai 1.000 °C, maka masa dari *gypsum board* akan berkurang sekitar 3% sampai dengan 6% dari berat awal. Ketika temperatur naik menjadi 2.000 °C pengurangan massa yang terjadi sebesar 16% sampai dengan 22% dari berat awal. Reduksi massa tersebut dapat dilihat pada gambar 3. Dalam jangka waktu yang panjang, hal ini bisa memungkinkan terjadinya lubang atau rongga yang menyebabkan integritasnya berkurang [5].



Gambar 3 Persentase Kehilangan Masa pada *Gypsum Board* Saat Mengalami Kenaikkan Temperatur [5]



Gambar 4 Perilaku Gypsum Board yang Terbakar [7]

Beragam ketebalan gypsum board yang berada dipasaran saat ini memungkinkan para desainer dapat melakukan eksperimen-eksperimen untuk mendapatkan hasil tingkat ketahanan api yang maksimal. Pada prinsipnya semakin tebal gypsum board yang dipakai maka tingkat ketahanan api yang dihasilkan akan semakin tinggi [14].

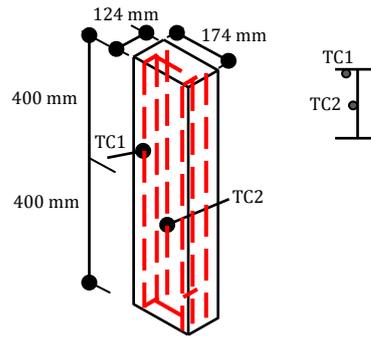
METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini akan digunakan profil baja WF sebanyak 4 buah. Baja yang di gunakan adalah baja karbon dengan mutu A36 yang setara dengan BJ41 dengan dimensi WF 150x75x5x7, yang mempunyai tegangan ultimate $f_u = 410$ MPa, tegangan leleh minimum $f_y = 250$ Mpa dan peregangan minimum 18% [16].

Berdasarkan SNI 03-1741-2.000 [16] ditetapkan panjang benda uji minimum adalah 80 cm. Pengujian ini juga bermaksud untuk membandingkan kuat tarik dan tegangan leleh dari benda uji yang mengalami uji pembakaran dan tidak dibakar.

Material yang akan digunakan sebagai bahan pelindung tahan api adalah gypsum board dengan variasi ketebalan 12mm dan 24mm. Untuk contoh pemasangan gypsum board pada benda uji dapat dilihat pada gambar 5.

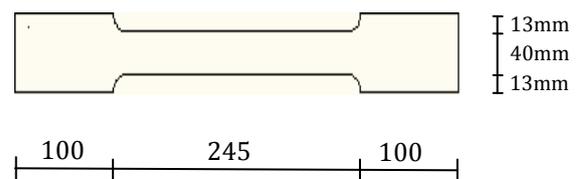
Pengujian dilakukan di Laboratorium Uji Api, Balai Sains Bangunan, Puslitbang Permukiman, Cileunyi, Bandung dengan menggunakan tungku api vertikal sesuai standar ISO, thermocouple, data logger (thermduct), manometer compound, camera dan alat bantu pengamatan lainnya.



Gambar 5 Contoh Benda Uji dan Pemasangan Gypsum Board 24 mm [18]

Perubahan kenaikan temperatur pada tungku pembakaran dilakukan sesuai dengan kurva standar pengujian dari ASTM E-119 [2]. Pembakaran pada benda uji dengan variasi ketebalan gypsum board tersebut dihentikan apabila baja telah mencapai titik kritisnya. penurunan kekuatan pada material baja akan turun secara drastis pada temperatur 430°C sampai dengan 540°C. Oleh karena itu pada penelitian eksperimental ini, pembakaran akan langsung diberhentikan apabila thermocouple pada benda uji telah mencapai 540°C.

Pengujian kuat tarik dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tarik yang tersisa dan tegangan ultimate material baja setelah mengalami kenaikan temperatur. Setelah pengujian pembakaran selesai dilakukan maka selanjutnya dilakukan pengujian kuat tarik. Pembuatan benda uji untuk pengujian kuat tarik dilakukan sesuai dengan standar yang telah ditentukan pada ASTM A-370. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6 Benda Uji untuk Pengujian Tarik [18]

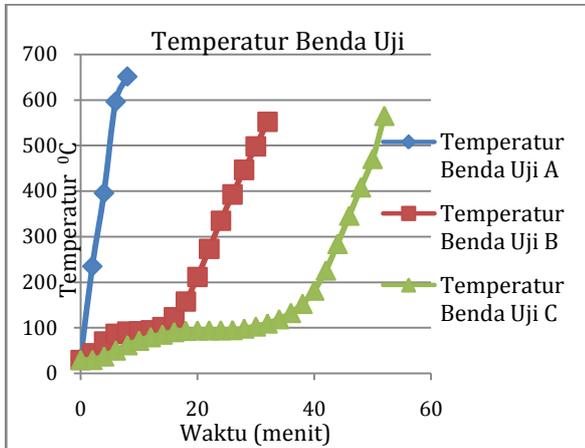
Tabel 1 Notasi untuk Setiap Benda Uji

Pelapis	Jumlah	Notasi	Pengujian	Ther-Mocouple
Tanpa Gypsum	1	A	Tidak dibakar	
	1	B	Bakar	TC ₁ , TC ₂
Gypsum 12 mm	1	C	Bakar	TC ₃ , TC ₄
Gypsum 24 mm	1	D	Bakar	TC ₅ , TC ₆

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah benda uji selesai di buat maka langkah selanjutnya adalah persiapan untuk melakukan pengujian pembakaran. Pencatatan kenaikan pada tungku pembakaran dilakukan setiap 2 menit dengan menggunakan data logger [16].

Hasil pengolahan data pada setiap benda uji dilakukan dengan metode Paired T-test. Metode ini dipakai dengan tujuan dapat membandingkan pengaruh lapisan *gypsum board* terhadap kenaikan temperatur pada benda uji dalam satuan menit.



Gambar 7 Kurva Hubungan Temperatur dan Waktu [18]

Tabel 2 Paired Samples Correlations antara Lapisan dan Temperatur Baja

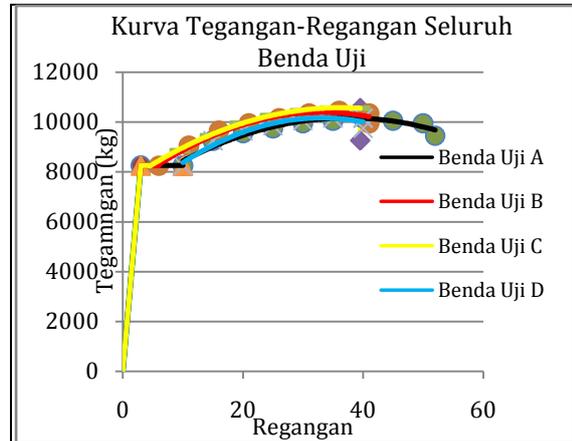
	N	Correlation	Sig.
Pair 1 Lapisan & Temp Baja	49	-.319	.026

Tabel 3 Paired Samples Correlations antara Temperatur Baja dan Waktu

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 Temp Baja & Waktu	49	.490	.000

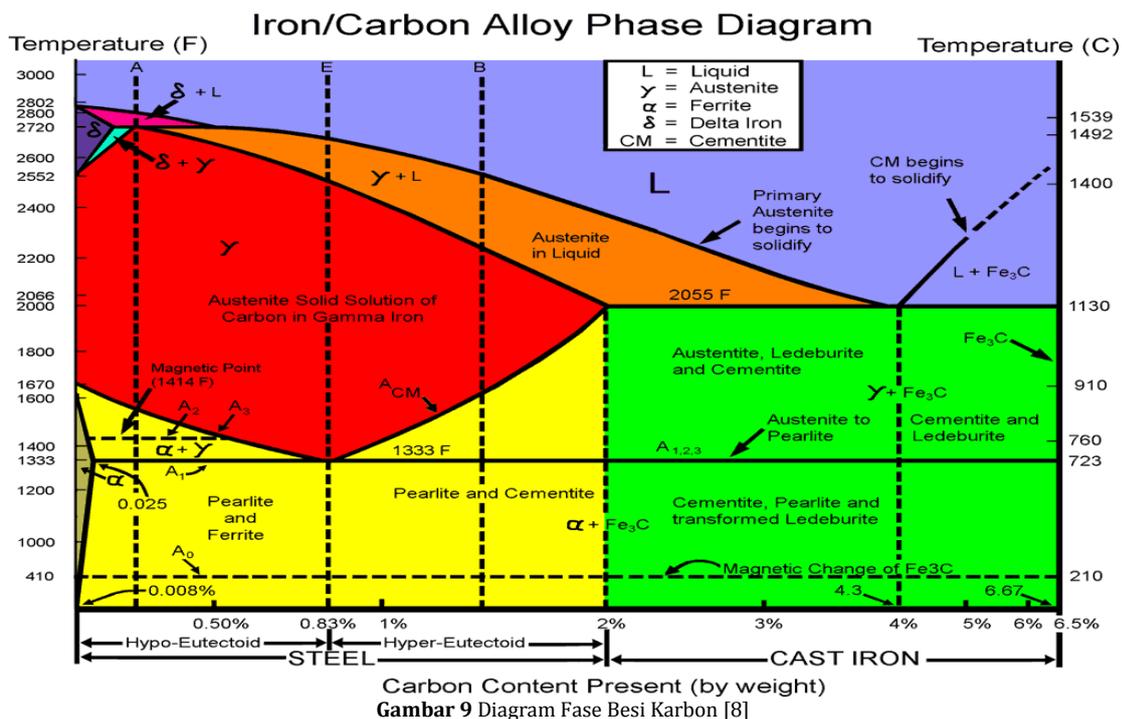
Dari hasil analisis data dengan menggunakan metode Paired T-test dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara

ketebalan lapisan pelindung *gypsum board* terhadap kenaikan temperatur pada benda uji. Hubungan antara kenaikan temperatur pada benda uji terhadap waktu juga menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal tersebut ditunjukkan dengan angka signifikan yang lebih kecil dari angka 0.05 sebagai syarat batas signifikan apabila menggunakan metode Paired T-test.



Gambar 8 Kurva Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Seluruh Benda Uji [18]

Dari hasil analisis data pada setiap benda uji untuk tegangan leleh dan tegangan *ultimate* yang sudah mengalami proses pembakaran baik yang dilapisi maupun tidak dilapisi *gypsum board* tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Hal tersebut ditunjukkan dengan angka signifikan yang lebih besar dari angka 0.05 sebagai syarat batas signifikan apabila menggunakan metode Paired T-test.



Gambar 9 Diagram Fase Besi Karbon [8]

Hasil dari pengujian kuat tarik yang telah dilakukan pada penelitian ini mendukung teori tentang diagram fase besi karbon. Benda uji yang telah mengalami pengujian pembakaran hingga mencapai temperatur kurang lebih 540 °C tidak mengalami perubahan fase. Berdasarkan teori tentang fase besi karbon yang dapat dilihat pada gambar 9 titik tranformasi agar terjadi perubahan fase tersebut terletak pada temperatur 723 °C. Setelah benda uji dibakar hingga mencapai temperatur 540 °C kemudian didinginkan pada udara terbuka, hal tersebut biasa disebut dengan istilah *normalizing* [1]

Oleh karena itu, benda uji (baja) yang telah mengalami uji pembakaran hingga mencapai temperatur 540 °C dan didinginkan pada udara terbuka (*normalizing*) tidak mengalami perubahan struktur kristal pembentuknya. Hal ini menyebabkan kekuatan tarik dan tegangan *ultimate* dari benda uji sebelum dan sesudah mengalami uji pembakaran tersebut tidak mengalami perubahan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dari penelitian eksperimental untuk sifat-sifat mekanikal *gypsum board* terhadap kenaikan temperatur pada profil baja dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perbedaan ketebalan *gypsum board* sebagai bahan lapisan pelindung profil baja saat mengalami kebakaran terdapat perbedaan yang signifikan
2. Pada saat pengujian pembakaran dilakukan, baja yang tidak di lapis oleh pelindung (*gypsum board*) memerlukan waktu selama 8 menit untuk mencapai temperatur 581,6 °C. Baja yang di lapis pelindung (*gypsum board*) dengan ketebalan 12 mm memerlukan waktu selama 32 menit untuk mencapai temperatur 552,1 °C. Baja yang di lapis pelindung (*gypsum board*) dengan ketebalan 24 mm memerlukan waktu 52 menit untuk mencapai temperatur 565,4 °C.
3. Kurva hubungan tegangan - regangan dari material baja pasca kebakaran (temperatur maksimum 540 °C) setelah mengalami pendinginan pada udara terbuka (*normalizing*), baik yang dilindungi maupun tidak dilindungi oleh lapisan *gypsum board*, dengan setiap ketebalan *gypsum board* 12 mm dan 24 mm tidak mempunyai perbedaan yang signifikan.

Saran

Hal-hal yang dapat disarankan adalah sebagai berikut :

1. Ditambahkannya penggunaan beban yang bekerja pada material baja atau pengujian tarik pada saat proses pengujian pembakaran

berlangsung. Hal ini bertujuan agar dapat ditentukan kondisi yang ideal seperti dilapangan sesungguhnya.

2. Dilakukan proses pengujian pembakaran dengan temperatur lebih dari 723 °C. Hal ini bertujuan agar terjadi perubahan fase pada material baja sesuai dengan diagram fase besi karbon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada Kepala Balai Sains Bangunan, Puslitbang Permukiman Pekerjaan Umum atas izin pemakaian sarana dan peralatan uji, para staf, teknisi dan operator Lab. Uji Api atas saran-saran, diskusi dan bantuannya dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Huda, Mafudz. (2008). *Perlakuan Panas*. Fakultas Teknologi Industri. Universitas Mercu Buana, Indonesia.
- ASTM Designation E 119. (2.000). *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Material*. "Annual Book of Standard American Society for Testing and Materials".
- Brannigan, Francis L. (1982). *Building Construction for the Fire Service*. 2nd Edition". NFPA. National Fire Protection Association. Batterymarch Park, Quincy, Massachusetts.
- CAE, Centre for Advanced Engineering. (1994). *Fire Engineering Design Guide*". University of Canterbury, New Zealand.
- Cramer, S.M. Friday, O.M. White R.H. (2003). *Mechanical Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures*". University of Wisconsin Madison, USA.
- Englekirk, Robert. (1993). *Steel Structures, Controlling Behavior Through Design*. University of California. Los Angeles. John Wiley and Sons.Inc. Canada.
- Gypsum Association. (2006). *Fire Resistance Design Manual Sound Control*. 18th Edition". Washington DC, USA.
- KNAUF Gypsum Indonesia. (2010). *Laporan Hasil Uji Ketahanan Api*". Laboratorium Uji Api. Balai Sains Bangunan, Puslitbang Permukiman, Cileunyi, Bandung.
- Kumar, Satish S.R. Kumar, Santha A.R. (2004), *Metallurgy of Steel*". Indian Institute of Technology Madras.
- Marcus, Samuel H. (1977). *Basics of Structural Steel Design*". Reston Publishing Company, Inc. A Prentice-Hall Company. Reston-Virginia
- Nwosu, D I. Kodur, V K R. (1999). *Behavior of Steel Frames Under Fire Condition*". *Proquest Science Journals* 26, 2, pg.156. *Canadian Journal of Civil Engineering*.

- Partowiyatmo, Amir. (1996). Efek Kebakaran pada Konstruksi Beton Bertulang. Majalah Konstruksi Edisi Februari 1996.
- Patterson, James. (1937). *"Simplified Design for Building Fire Safety"*. Iowa State University, United States of America.
- Salmon, Charles G. Johnson, John E. (1980). *"Steel Structure, Design and Behavior"*. 2nd Edition. University of Wisconsin, Madison
- Schultz, Neil. (1952). *"Fire and Flammability Handbook"*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- SNI 03-1741-2.000. (2000). *Metode Pengujian Ketahanan Api Komponen Struktur Bangunan*. Departemen Pekerjaan Umum.
- SNI 03-1729-2002. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*. Departemen Pekerjaan Umum.
- Suprpto (2007). "Sistem Proteksi Kebakaran Pasif, Kaitannya dengan Keselamatan Jiwa," Jurnal Permukiman Vol 2 No. 2 September 2007. hal 104-117.
- Wibawa, T.E., dan Soegihardjo, H. (2010). *Studi Sifat-sifat Mekanikal Profil Baja yang Terbungkus Gypsum Board Setelah Mengalami Kebakaran*. Tesis Program Magister Bidang Keahlian Struktur. Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya.