



Analisa Teknis Sambungan *Butt-Joint* pada Konstruksi Badan Kapal Pasca Terbakar dengan Material Baru berbasis Pendekatan Eksperimen

Imam Baihaqi ^{1)*}, Heri Supomo ²⁾

¹⁾Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

disubmit pada : 05/02/18

direvisi pada : 11/04/18

diterima pada : 17/05/18

Abstrak

Kebakaran pada kapal dapat merusak karakteristik mekanik dan susunan kristal material baja kapal. Perambatan panas akibat api yang membara pada kapal dapat mencapai suhu sampai dengan 800°C -1000°C. Tujuan dari penulisan paper ini adalah untuk menginvestigasi kekuatan sambungan las *butt-joint* pada material baja kapal pasca terbakar yang disambung dengan material baja baru. Uji tarik sambungan las dilakukan untuk menentukan kekuatan tarik puncak (*ultimate*) dan kekuatan luluh (*yield*) serta regangan, sedangkan uji bending (*face bend* dan *root bend*) dilakukan untuk mengetahui kualitas sambungan las secara visual. Kondisi pelat terbakar disimulasikan dengan membakar pelat kapal sesuai dengan standard ISO 834 dengan berbagai variasi suhu bakar mulai dari 200°C sampai dengan 1000°C. Patahan hasil uji tarik berada di basemetal pada semua variasi dengan nilai kekuatan tarik puncak di atas 430 MPa (di atas nilai raw material basemetal). Pada variasi suhu 300°C s.d 650°C patahan hasil uji tarik berada pada baja pasca terbakar, sedangkan pada variasi suhu 700°C s.d. 1000°C patahan berada pada material baja baru. Sedangkan hasil uji bending menunjukkan secara visual tidak terdapat bukaan atau cacat pada hasil uji pada semua variasi. Nilai regangan sambungan las mengalami penurunan sebesar >10% pada suhu 700°C sampai dengan 1000°C.

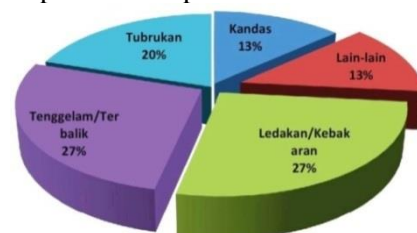
Copyright © 2018, **KAPAL**, pISSN:1829-8370, eISSN : 2301-9069

Kata Kunci : Sambungan las, Pasca terbakar, Konstruksi kapal, Baja kapal, Weldability

1. PENDAHULUAN

Kebakaran pada kapal menimbulkan kerugian yang besar. Korban jiwa meninggal dan luka-luka merupakan beberapa akibat dari terjadinya kebakaran pada kapal. Berdasarkan data dari KNKT (Komisi Nasional Keselamatan Transportasi) terkait data investigasi kecelakaan pelayaran-KNKT tahun 2010-2016 [1] terdapat 337 korban meninggal/hilang dan 474 korban luka-luka. Berdasarkan data tersebut penyebab kecelakaan kapal pada saat berlayar di laut adalah dikarenakan terbakar/meledak sebesar 27%.

Prosentase kecelakaan karena kebakaran/ledakan merupakan penyebab paling besar sama dengan kecelakaan karena tenggelam/terbalik. Secara lengkap prosentase kecelakaan kapal di laut berdasarkan data dari KNKT mulai tahun 2010-2016 dapat disimak pada Gambar 1.



Gambar 1. Prosentase kecelakaan kapal dilaut berdasarkan penyebabnya [1].

*) Penulis Korespondensi:
Email : imam_b@na.its.ac.id

Beberapa kejadian kebakaran kapal di Indonesia juga diberitakan oleh media massa [2], [3], [4]. Diantara kecelakaan tersebut adalah kecelakaan kapal tuna di perairan Australia, terbakarnya kapal KM. Dharma Kencana II, meledak dan terbakarnya kapal Pertamina, dan terbakarnya KM. Mutiara Sentosa di Masalembu, Madura. Peristiwa kecelakaan tersebut menimbulkan kerugian yang tidak kecil. Korban jiwa (meninggal dan luka-luka), rusaknya barang yang dibawa dan pada akhirnya kerusakan secara fisik pada kapal yang terbakar.

Kebakaran pada kapal dapat mengakibatkan kerusakan pada bagian kapal baik secara sebagian atau keseluruhan. Kerusakan ini kemungkinan masih bisa diperbaiki atau bisa digunakan kembali khususnya pada konstruksi badan kapal yang terbakar sebagian. Oleh karena itu material baja kapal pasca terbakar perlu dilakukan investigasi lebih lanjut untuk menentukan proses perbaikannya. Kebakaran pada kapal selain menimbulkan kerugian berupa adanya korban jiwa, juga dapat merusak kapal itu sendiri. Kerusakan pada kapal dapat terjadi pada bagian badan kapal (*hull construction*), permesinan kapal (*machinery*) dan peralatan serta perlengkapan kapal (*outfitting*) [5]. Indikasi kerusakan pada badan kapal ditandai dengan adanya deformasi pada pelat dan penegar kapal. Semakin besar deformasi yang terjadi, maka suhu kebakaran kapal cukup/sangat tinggi.

Kerusakan lain yang mungkin terjadi pada badan kapal khususnya pada bagian pelat dan penegar kapal adalah berubahnya karakteristik mekanik, *weldability* (kemampulasan) dan susunan kristal / struktur mikro. Berdasarkan standar ISO 834 [6] yang tertulis dalam literatur [7], dijelaskan bahwa suhu pengujian kebakaran pada sebuah struktur bisa mencapai suhu sekitar 800°C dalam rentang waktu 30 menit dan pada rentang waktu 90 menit suhu bakar bisa mencapai sekitar 1000°C. Jika kapal terbakar selama lebih dari 30 menit, maka suhu bakar akan melebihi suhu kristalisasi material baja kapal. Suhu A1 (suhu kristalisasi) merupakan suhu dimana material akan mengalami perubahan susunan kristal. Perubahan susunan kristal akan sangat mempengaruhi sifat mekanik material [8].

Beberapa penelitian terkait sifat mekanik material baja karbon rendah pasca terbakar telah diteliti. [5] meneliti terkait karakteristik material baja kapal pasca terbakar, dimana material pelat pasca terbakar tidak bisa digunakan lagi jika terbakar sampai pada suhu $\geq 650^{\circ}\text{C}$ karena nilai regangan (*strain*) kurang dari yang disyaratkan oleh Klasifikasi. [9] melakukan penelitian terkait sambungan las tumpul pada material Q235 dan

Q345 (baja karbon rendah untuk struktur bangunan sipil). Studi dilakukan untuk mencari karakteristik mekanik sambungan las tumpul setelah terkena panas api kebakaran. Variasi suhu pemanasan mulai dari 400°C-800°C dan didinginkan pada suhu ruangan. Uji tarik dilakukan pada spesimen ini untuk mengetahui hubungan gaya dengan *displacement* (elongasi) dan karakteristik mekanik yang relevan (kekuatan *yield* dan *ultimate*) pada variasi suhu. Kesimpulan yang didapatkan dari hasil pengujian adalah: 1. Karakteristik mekanik sambungan las tumpul baja pasca terbakar dipengaruhi oleh *grade* material dan suhu pemanasan (pada saat terbakar); 2. Ketika suhu melebihi 600°C, kekuatan *yield* dan *ultimate* baja Q235 dan Q345 mulai menurun. Ketika suhu mencapai 800°C, kekuatan *yield* dan *ultimate* dari Q235 turun menjadi 87% dan 91% dibandingkan dengan suhu ruangan. Sedangkan pada material Q345 kekuatannya turun menjadi 83% dan 87%.

[10] melakukan eksperimen pada sambungan las tumpul material Q345 yang dibakar dari suhu 200°C sampai dengan 800°C kemudian didinginkan dengan udara dan air yang disemprotkan dengan *water jet*. Hasilnya menunjukkan bahwa sambungan las patah pada las-lasan pada suhu 600°C ke atas jika didinginkan dengan air, sedangkan pada pendinginan dengan udara patahan pada las-lasan terjadi pada suhu 500°C ke atas.

Penelitian terkait sambungan las pada struktur baja Q345B berupa struktur balok ke kolom (*beam to column*) setelah terbakar juga telah dilakukan [11]. Hasilnya menunjukkan bahwa kegagalan terjadi pada sambungan las yang setelah suhu kristalisasi (suhu 725°C).

[12] membuat penelitian terkait sambungan las baja pasca terbakar dengan pelat baru. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik, *hardness* dan uji metalografi. Suhu bakar yang digunakan hanya 700°C dan 900°C saja. Patahan hasil uji tarik berada pada *basemetal* pelat pasca terbakar pada kedua suhu. Pada *paper* ini masih belum ada analisis dan informasi yang lebih komprehensif terkait hasil uji tarik, *hardness* dan metalografi. [13] memberikan rekomendasi untuk menggunakan kembali baja struktur bangunan pasca terbakar dan membuat prosedurnya. namun jenis baja yang diteliti bukan baja kapal. Sehingga perlu dilakukan investigasi lebih dalam terkait sambungan baja kapal pasca terbakar dengan pelat baja yang baru.

Berdasarkan tinjauan literatur yang ada dapat dirangkum bahwa beberapa penelitian sudah cukup banyak meneliti terkait baja pasca terbakar dengan berbagai suhu, namun hanya satu saja

yang meneliti baja pasca terbakar pada kapal. Beberapa penelitian juga sudah memberikan rekomendasi praktis untuk menggunakan kembali baja pasca terbakar dengan kondisi tertentu, namun beberapa kesimpulan menunjukkan bahwa sifat baja pasca terbakar sangat tergantung dari *grade* materialnya. Selain itu publikasi terkait baja pasca terbakar yang disambung dengan material baru tidak memberikan analisis yang mendalam hanya berupa hasil tanpa adanya argumen yang cukup. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan eksperimen tentang karakteristik sambungan las baja kapal pasca terbakar yang disambung dengan material baja baru.

Tujuan dari penulisan *paper* ini adalah untuk menginvestigasi kekuatan sambungan las *butt-joint* pada material baja kapal pasca terbakar yang disambung dengan material baja baru dan kualitas sambungan las secara visual dilihat dari hasil uji bending. Hasil uji tarik dan bending pada sambungan las ini akan dapat digunakan sebagai acuan dan referensi untuk menentukan prosedur perbaikan pada konstruksi baja pasca terbakar yang akan memberikan manfaat kepada praktisi dan pemilik kapal untuk menentukan bagaimana perbaikan pada kapal pasca terbakar, khususnya pada kasus kapal terbakar sebagian.

2. METODE

2.1. Spesimen Uji

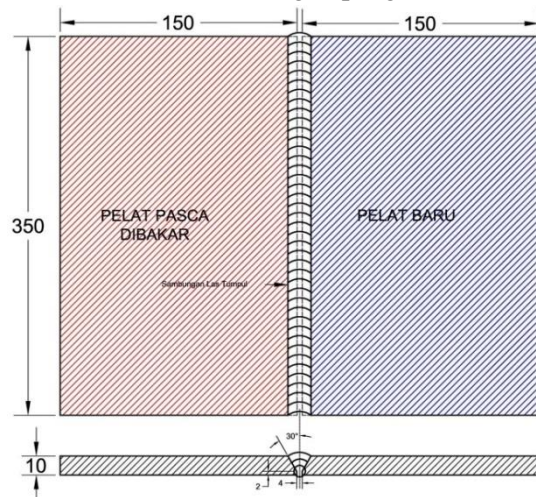
Material yang digunakan pada pengujian ini adalah material baja kapal standard KI Grade A [14]. Nilai kuat tarik puncak baja ini adalah sebesar 430 MPa, sedangkan kuat tarik luluhnya adalah sebesar 280 MPa dan komposisi kimia sesuai tertera pada *mill certificate* seperti pada Tabel 1. Pelat dipotong dengan ukuran 150 mm x 350 mm sesuai standar BKI [15], kemudian dibakar dengan *furnace* (Gambar 2) dengan variasi suhu 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C dan 1000°C dengan kecepatan sesuai standar ISO 834 [6]. Suhu 100°C dan 200°C tidak disertakan dalam pengujian karena akan memberikan efek yang tidak signifikan. Setelah mencapai suhu variasi, masing-masing pelat baja didinginkan dengan air laut. Baja yang telah diberikan perlakuan bakar dan didinginkan kemudian disambung dengan pelat baja kapal baru (tanpa perlakuan). Jenis sambungan yang digunakan adalah sambungan tumpul *single V back weld* Gambar 3 dengan menggunakan teknik las SMAW. Kawat las yang digunakan adalah E6013 dengan diameter 3.2 mm. Sambungan las pada baja tanpa perlakuan panas diikutkan sebagai acuan kondisi awal.

Tabel 1. Komposisi kimia spesimen baja kapal.

C	Si	Mn	P	S
0.168	0.212	1.05	0.014	0.006



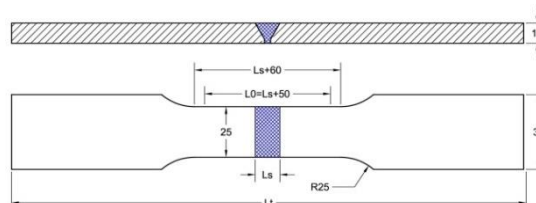
Gambar 2. Furnace dengan pengontrol suhu.



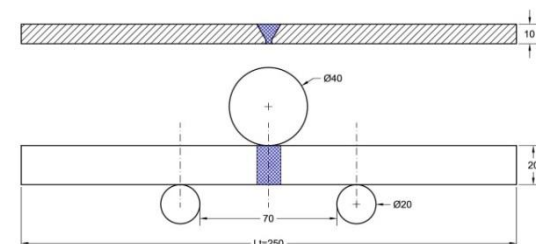
Gambar 3. Ukuran spesimen sambungan las (ukuran dalam mm) [15]

2.2. Prosedur Pengujian

Setelah dilakukan pengelasan, maka material dipotong menjadi spesimen uji tarik dan uji tekuk sesuai dengan standar Biro Klasifikasi Indonesia [15] dengan ukuran seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Spesimen uji tarik



Gambar 5. Spesimen uji bending

Uji tarik dan tekuk dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* MFL/UFD.20 (Gambar 6) dengan kapasitas maksimum 20 ton untuk uji statis. Pada uji tarik, data hasil pengujian yang dihasilkan adalah grafik besar gaya yang bekerja dan regangan yang tercetak langsung pada kertas milimeter. Pada uji tarik dengan mesin ini, terdapat dua penjepit (atas dan bawah). Penjepit bawah bersifat statis sedangkan penjepit atas menarik spesimen sampai putus. Sedangkan pada uji tekuk digunakan mandrel dengan ukuran 40 mm dengan jarak antar roller penumpu sebesar 70mm (diameter mandrel + 2 x tebal spesimen). Uji tekuk dilakukan sampai spesimen membentuk sudut 30°. Spesimen tekuk diuji pada posisi *root* dan *face*. Kemudian diamati secara visual apakah terdapat bukaan atau cacat pada hasil uji tekuk.



Gambar 6. Peralatan uji tarik (*Universal Testing Machine*) MFL/UFD.20.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji Mekanik

Pada bagian pembahasan ini akan dilakukan analisis terkait hasil uji mekanik yang telah dilakukan sebelumnya. Analisis kekuatan tarik puncak (*ultimate strength*) dan kekuatan tarik luluh (*yield strength*) dihitung dari hasil uji.

Spesimen hasil uji tarik sambungan las ditunjukkan pada Gambar 7. Masing-masing variasi dilakukan pengujian sebanyak 2 spesimen. Terlihat pada spesimen bagian atas adalah dari material pelat baru, sedangkan bagian adalah pelat pasca terbakar dengan variasi suhu.

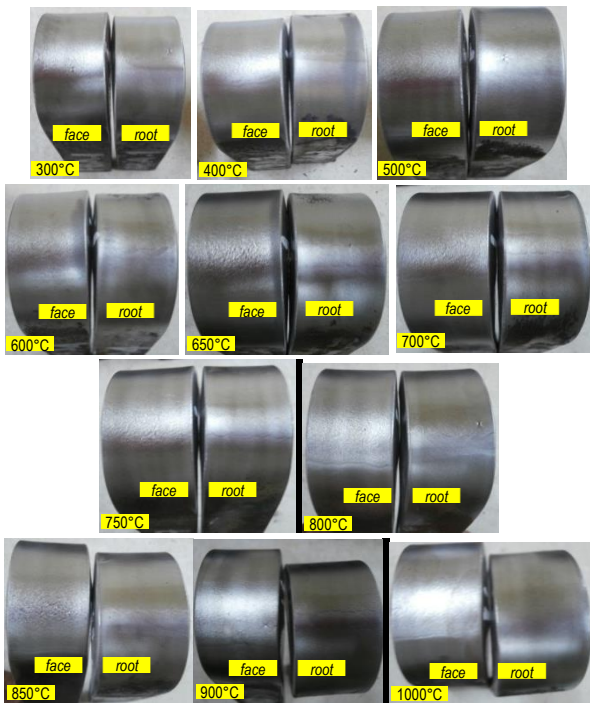
Pada hasil uji mekanik terlihat patahan terjadi pada *basemetal* pada semua variasi. Tidak ada

patahan yang terjadi pada *weld-metal*. Hasil ini menunjukkan bahwa hasil sambungan las pada pelat pasca terbakar dengan pelat baru memenuhi standar pengujian tarik ditandai dengan letak patahan hasil uji tarik pada *basemetal*. Namun pada variasi suhu 300°C sampai dengan 650°C, patahan terjadi pada *basemetal* pelat baru dan pada pelat pasca terbakar. Sedangkan pada variasi suhu 700°C sampai dengan 1000°C patahan terjadi pada *basemetal* pelat baru semua. Hal ini menunjukkan bahwa *basemetal* pada pelat pasca terbakar suhu 700°C sampai dengan 1000°C memiliki kekuatan tarik yang lebih besar dibandingkan dengan pelat baru. Struktur baja pasca terbakar pada suhu 700°C ke atas mendekati suhu kristalisasi (suhu A_1) pada diagram Fe-C [8] Hasil ini juga diperkuat oleh penelitian [5] terkait sifat mekanik baja kapal pasca terbakar yang mengalami kenaikan kuat tarik secara signifikan pada suhu bakar di atas 650°C.



Gambar 7. Spesimen hasil uji tarik.

Sedangkan spesimen hasil uji tekuk ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil uji tekuk pada bagian *face* dan *root* menunjukkan bahwa pada semua variasi suhu hasilnya tidak ada cacat atau bukaan sama sekali. Dalam hal ini berarti kekuatan sambungan las pada pelat kapal pasca terbakar dan pelat kapal baru adalah memenuhi standar pengujian tekuk. Berdasarkan hasil uji mekanik (tarik dan tekuk) pelat kapal pasca terbakar yang dilas dengan pelat kapal baru memenuhi standar Biro Klasifikasi Indonesia (*Volume VI Rules For Welding 2015 Edition*) [14], dimana bukaan yang diizinkan tidak lebih dari 3 mm.



Gambar 8. Spesimen hasil uji tekuk.

3.2. Tegangan Luluh dan Puncak

Gaya/beban yang diukur pada saat pengujian adalah beban *yield* dan *ultimate*. Sedangkan *displacement* yang diukur adalah *displacement* pada saat material patah (*break*). Berdasarkan hasil perhitungan sesuai dengan persamaan (1), maka akan didapatkan nilai tegangan *yield* dan *ultimate*. Nilai hasil tegangan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

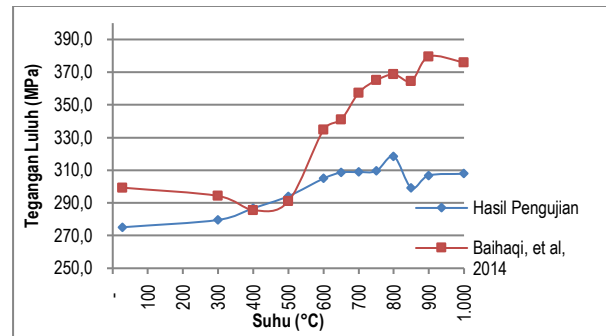
Tabel 2. Data hasil uji tarik.

Suhu (°C)	Tegangan Luluh rata-rata (Mpa)	Tegangan Puncak rata-rata (Mpa)	Displacement rata-rata (mm)
Normal Plate	275.1	436.3	39.31
300	279.6	443.1	39.07
400	286.7	442.1	37.38
500	294.1	448.1	37.16
600	304.9	448.4	38.11
650	308.6	453.5	37.76
700	308.9	454.5	35.17
750	309.5	455.7	33.04
800	318.4	461.7	32.23
850	299.3	463.1	31.73
900	306.8	454.1	31.76
1,000	307.8	454.3	32.48

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

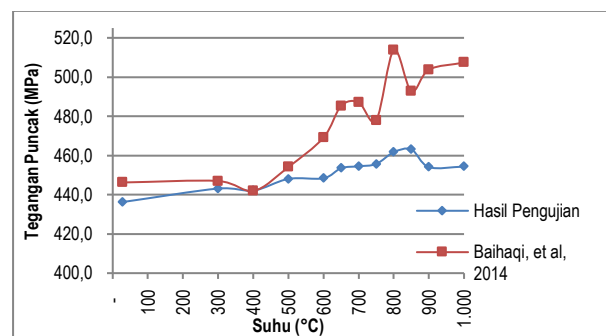
Data hasil tabulasi uji tarik berupa tegangan *yield* dan *ultimate* ini dibandingkan dengan acuan pada sambungan las pada pelat baru tanpa perlakuan dibakar. Grafik hubungan antara suhu

dan tegangan (*yield* dan *ultimate*) dapat disimak pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11. Grafik-grafik tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian *raw material* baja kapal pasca terbakar hasil penelitian [5].



Gambar 9. Tegangan luluh hasil uji

Hasil uji tarik pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan luluh mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan suhu bakar. Kenaikan terjadi mulai dari suhu bakar 300°C sampai dengan suhu bakar 800°C. Kemudian terjadi penurunan sedikit pada suhu 850°C. Pada suhu 900°C dan 1000°C nilai tegangan luluh konstan pada nilai sekitar 306 MPa. Hasil uji ini terjadi, kemungkinan dikarenakan pada suhu bakar 650°C patahan terjadi pada bagian pelat yang terbakar, sedangkan pada suhu 700°C patahan pada spesimen terjadi pada pelat baru tanpa perlakuan bakar. Pada data hasil uji [5] nilai tegangan luluh mengalami kenaikan signifikan pada suhu 500°C sampai dengan suhu 1000°C. Hanya pada kenaikan suhu 800°C-850°C terjadi sedikit penurunan tegangan luluh.



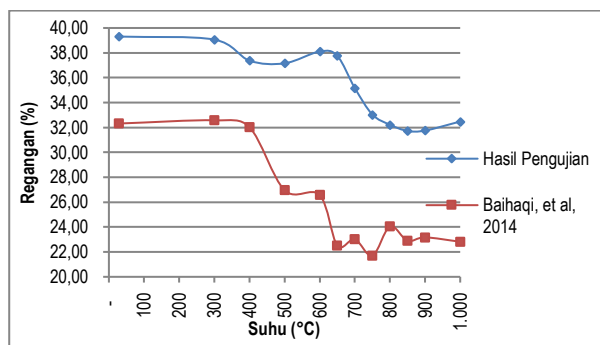
Gambar 10. Tegangan puncak hasil uji

Seperti halnya pada nilai tegangan luluh, nilai tegangan puncak hasil pengujian juga mengalami *trend* yang mirip (Gambar 10). Pada kenaikan suhu mulai dari suhu bakar 300°C sampai dengan

suhu 850°C terjadi kenaikan secara linear. Kenaikan ini terjadi karena meningkatnya nilai tegangan tarik baja pasca dibakar. Hal ini diperkuat oleh hasil uji [5] dimana nilai uji material mentah baja naik seiring dengan suhu bakar yang naik. Hanya pada suhu 900°C dan 1000°C terjadi penurunan secara tidak signifikan. Hal ini terjadi karena menurunnya kekuatan sambungan baja pasca terbakar dengan baja baru.

3.3. Keuletan (*Ductility*)

Keuletan baja didefinisikan berdasarkan deformasi bahwa baja masih bisa bertahan sebelum patah. Keuletan sambungan baja kapal pasca terbakar dengan baja baru dipelajari dengan membandingkan nilai tegangan (puncak) dan regangan baja dengan suhu bakar. Gambar 11 merupakan nilai regangan sambungan baja pasca terbakar dibandingkan dengan hasil uji [5]. Nilai keuletan sambungan baja mulai turun secara signifikan ketika pemanasan suhu di atas 650°C. Trend ini mirip dengan hasil uji baja kapal pasca terbakar pada literatur. Semakin tinggi suhu kebakaran maka keuletan sambungan baja semakin menurun berdasarkan grafik ini.



Gambar 11. Regangan hasil uji

Berdasarkan Gambar 7, hasil uji tarik sambungan las menunjukkan bahwa bentuk patahan dari uji tarik yang dilakukan mengalami patahan. Patahan ini terjadi pada bagian baja pasca terbakar dan baja baru. Terlihat pada spesimen bahwa hasil patahan menunjukkan kegagalan yang *ductile* (ulet) dengan leher cekikan, tidak ada kegagalan *brittle* (rapuh) terlihat pada sambungan baja kapal berapapun tingginya suhu yang diberikan pada spesimen. Pengamatan ini juga mengindikasikan bahwa kurang ulet tidak begitu berpengaruh pada baja kapal pasca terkena panas api bakar.

3.4. Perbandingan dengan beberapa literatur

Informasi terkait sifat mekanik sisa dari sambungan struktur baja pasca terbakar atau setelah terkena suhu tinggi cukup terbatas. Pada Standard British 5950-8 (2003) Annex B [16] terdapat beberapa rekomendasi untuk penggunaan kembali baja pasca terbakar. Standar tersebut merekomendasikan bahwa baja S235 dan S275 minimal 90% dari kekuatan mekanik kembali tanpa memperhatikan suhu yang diberikan (bahkan sampai dipanaskan di atas suhu 1000°C). Untuk baja standar S355 dapat diasumsikan bahwa minimal 75% dari kekuatan kembali pada pendinginan dari suhu di atas 600°C. Untuk beberapa grade tertentu untuk baja finishing dingin (*cold-finished*) dikatakan bahwa baja tersebut bisa kembali 90% pada kekuatan nominal aslinya. Standard BS5950 memiliki beberapa saran untuk baja cor, baja *reinforced* dan baja *pre-stressing*. Selama ini belum ada desain standar untuk struktur baja yang memberikan saran untuk menggunakan kembali struktur baja setelah terkena api.

Outinen [17], [18] melakukan pengujian tarik pada baja S355 dan S350 dimana diambil dari konstruksi baja setelah diuji pada ketinggian suhu sampai dengan 710°C. Outinen mencermati jika distorsi struktur baja masih dalam batasan toleransi, kekuatan dari material masih cukup. Namun hal ini meragukan karena tidak ada data sifat mekanik secara kuantitatif yang dilaporkan pada hasil pengujiannya.

Berdasarkan nilai regangan hasil uji, nilai regangan baja di atas 31%. Nilai ini cukup besar dan regangan baja masih cukup baik. Jika dibandingkan dengan standard baja ASTM A36 [19], baja harus memiliki standard regangan minimal 23%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil uji regangan masih memenuhi standard ASTM A36. Nilai regangan yang cukup ini menjelaskan bahwa sambungan baja pasca terbakar dengan baja baru memiliki nilai sambungan yang lentur. Namun perlu diperhatikan patahan hasil uji, dimana pada suhu di atas 650°C (diatas suhu kristalisasi), patahan terjadi pada baja baru (baja tanpa perlakuan panas), tidak pada baja pasca terbakar. Hal ini memperjelas bahwa baja pasca terbakar memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan panas.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian pembahasan yang telah dipaparkan, maka dapat disimpulkan bahwa pelat kapal pasca terbakar memiliki tegangan tarik dan luluh meningkat seiring dengan suhu perlakuan

bakar, sedangkan nilai regangan cenderung turun. Nilai regangan dan *ductility* masih memenuhi standard dilihat dari nilai regangan dan hasil patahan yang *ductile* (bersudut). Patahan hasil uji tarik bisa terjadi pada bagian basemetal pelat baru atau pada basemetal pasca terbakar. Patahan pada basemetal pelat baru terjadi pada suhu dibawah 650°C, sedangkan patahan pada basemetal baru terjadi pada suhu bakar diatas 650°C sampai dengan 1000°C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknologi & Manajemen Produksi Kapal dan Laboratorium Konstruksi & Kekuatan Kapal atas bantuan persiapan dan pengujian material ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Komite Nasional Keselamatan Transportasi, 'Data Investigasi Kecelakaan Pelayaran Tahun 2010 - 2016', Jakarta, 2016.
- [2] A. Jatmiko, 'Kapal Pertamina Meledak dan Terbakar di Batam, 5 Orang Tewas', Jakarta, 16-Jan-2017.
- [3] N. Qodar, 'KM Mutiara Sentosa Terbakar di Masalembu Madura, 3 Orang Tewas', Jakarta, 20-May-2017.
- [4] M. Ridlo, 'Kapal Tuna Terbakar di Perairan Australia, 5 ABK Cilacap Hilang', Cilacap, 28-Nov-2017.
- [5] I. Baihaqi, D. Manfaat, and H. Supomo, 'Karakteristik Mekanik Baja Karbon Rendah pada Konstruksi Badan Kapal Pasca Terbakar', in *Seminar Nasional Kelautan*, 2014.
- [6] International Standards Organization, *Fire resistance tests—Elements of building construction*. 1975.
- [7] R. M. Lawson and G. M. Newman, *Fire resistant design of steel structures - a handbook to BS 5950: Part 8*. Berkshire: The Steel Construction Institute, 1990.
- [8] ASM International. Handbook Committee., *ASM handbook*. [Materials Park Ohio]: ASM International, 1991.
- [9] H. Liu, X. Liao, Z. Chen, and S. S. Huang, 'Post-fire residual mechanical properties of steel butt weld — Experimental study', *J. Constr. Steel Res.*, vol. 129, pp. 156–162, 2017.
- [10] G. Zhang, M. C. Zhu, V. Kodur, and G. Q. Li, 'Behavior of welded connections after exposure to elevated temperature', *J. Constr. Steel Res.*, 2017.
- [11] M.-C. Zhu and G.-Q. Li, 'Behavior of beam-to-column welded connections in steel structures after fire', *Procedia Eng.*, vol. 210, pp. 551–556, 2017.
- [12] Y. Y. W. Putra, 'Analisa Hasil Repair Sambungan Las Baja SA36 Setelah Kebakaran yang disambung Ulang dengan Baja SA36 Baru dengan Pengelasan SMAW Menggunakan Filler E7016 Diameter 2.6mm Terhadap Sifat Mekanik Material', Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [13] C. I. Smith, B. R. Kirby, D. G. Lapwood, K. J. Cole, A. P. Cunningham, and R. R. Preston, 'The reinstatement of fire damaged steel framed structures', *Fire Saf. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–62, 1981.
- [14] BKI, *Volume V Rules For Materials 2014 Edition*, vol. V. 2014.
- [15] BKI, *Volume VI Rules For Welding 2015 Edition*. 2015.
- [16] Institution BS, *Structural use of steelwork in building. Part 8: Code of practice for fire resistant design*. London, 1998.
- [17] J. Outinen, O. Kaitila, and P. Mäkeläinen, 'High-temperature testing of structural steel and modelling of structures at fire temperatures', Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures, 2001.
- [18] J. Outinen, 'Mechanical properties of structural steels at high temperatures and after cooling down', Helsinki University of Technology, 2007.
- [19] ASTM, 'Standard Specification for Carbon Structural Steel (ASTM A-36)', West Conshohocken: United States., 2009.