

## PENGARUH TEMPERATUR TEMPER TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN KETAHANAN KOROSI PADUAN Fe-1,52Al-1,44C

Ratna Kartikasari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin STTNAS Yogyakarta

Masuk: 3 Maret 2009 , revisi masuk: 23 Juni 2009, diterima: 27 Juni 2008

### ABSTRACT

*On the basis of economic and lower density considerations, Fe-Al-C alloy could be a good candidate for replacing some of the conventional stainless steel. Wherein, Al is used to replace the expensive alloy element in conventional Fe-Cr-C system. The aim of the research is to investigate tempering temperature influence to mechanical properties and corrosion resistance of Fe-1,52Al-1,44C in the 3.5% NaCl solution. Fifty kilograms of Fe-Al-C were prepared from mild steel scrap, high purity aluminium, and Fe-C. The alloy was prepared in a high frequency induction furnace with alloying was done in the ladle. Optical microstructure, mechanical properties and corrosion rate were examined. The corrosion rate, were carried out with immersion method in 3.5% NaCl. The optical micrograph shows that as cast Fe-1,52Al-1,44C alloy has ferrite and pearlite microstructure and has tendency to become ferritic microstructure with increasing tempering temperature. Maximum tensile strength and maximum hardness took place after hardening that was respectively 74,44kg/mm<sup>2</sup> and 298,7 VHN. Maximum elongation was reached at 450°C tempering temperature. The result of corrosion testing showed that the alloy has decreasing corrosion rate with the increasing tempering temperature.*

**Keywords:** Fe-Al-C Alloy, Conventional Stainless Steel, Tempering Temperature, Corrosion Resistance.

### INTISARI

Paduan Fe-Al-C merupakan paduan baru kandidat pengganti baja tahan karat (*stainless steel*) konvensional, dimana unsur Al berperan menggantikan unsur mahal (Cr) pada *stainless steel* konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur temper terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C dalam larutan 3,5% NaCl. Bahan baku peleburan terdiri dari: *scrap* baja rendah Mn, Al murni dan Fe-C. Peleburan menggunakan dapur induksi frekwensi tinggi kapasitas 50 kg dengan pemaduan (*alloying*) di dalam *ladle*. Austenitisasi sampai temperatur 900°C dilanjutkan dengan *quenching* dalam media air. Proses temper dilakukan pada temperatur 250°C, 300°C, 350°C, 400°C dan 450°C. Pengujian yang dilakukan adalah foto struktur mikro, pengujian tarik, pengujian kekerasan dan pengujian korosi dalam media 3,5% NaCl dengan metoda kehilangan berat. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* mempunyai struktur ferit dan perlit, kecenderungan pembentukan struktur ferit terjadi dengan semakin tinggi temperatur temper. Kekuatan tarik maksimum terjadi setelah *hardening* yaitu sebesar 74,44kg/mm<sup>2</sup> dengan regangan tertinggi sebesar 31,3% setelah temper 450°C. Kekerasan tertinggi sebesar 298,7 VHN terjadi setelah *hardening*. Hasil pengujian korosi menunjukkan bahwa laju korosi paduan 1,26Al-1,05C *as cast* akan menurun dengan semakin tinggi temperatur temper.

**Kata Kunci:** Fe-Al-C, Baja Tahan Karat Konvensional, Temperatur Temper, Ketahanan Korosi.

### PENDAHULUAN

*Stainless steel* (baja tahan karat) merupakan paduan berbasis besi (Fe)

dengan kadar cromium (Cr) paling sedikit 10,5% (Shackelford, 1992). Fe-Cr-C adalah paduan baja tahan karat jenis feritik

<sup>1</sup>[kartikafajar@yahoo.com](mailto:kartikafajar@yahoo.com)

dimana Cr berperan terhadap ketahanan korosi sekaligus berfungsi sebagai penstabil struktur ferit (Leslie, 1983). Keunggulan paduan jenis ini ditentukan oleh keberadaan unsur Cr. Kekurangan yang dimiliki oleh *stainless steel* adalah terutama pada mahalnya biaya produksi. Karena Cr merupakan material strategis dan mahal di banyak negara, dimana 95% cadangan Cr dunia hanya terdapat di Afrika Selatan dan Zimbabwe.

Berdasar pada alasan ekonomi dan strategi maka diperlukan upaya untuk menemukan paduan baru yang dapat menggantikan *stainless steel* konvensional. Diantara sistim paduan yang paling menjanjikan dapat menggantikan peran paduan Fe-Cr-C adalah paduan Fe-Al-C, dimana unsur Al menggantikan unsur Cr (Tjong, 1986 dan Wang, 1988). Unsur aluminium (Al), diketahui keberadaannya di dunia sangat melimpah, yaitu merupakan unsur terbesar ketiga di bumi dan harganya relatif murah (Shackelford, 1992) dan proses produksinya relatif mudah (Frommeyer, 2000).

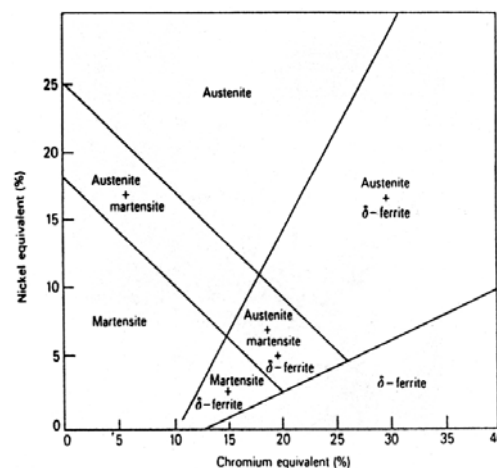
Paduan Fe-Al-C merupakan kandidat yang menjanjikan untuk menggantikan beberapa jenis *stainless steel* konvensional pada aplikasi temperatur medium sampai tinggi (Huang, 2006). Paduan Fe-Al-C feritik menunjukkan sifat-sifat fisik, mekanik dan teknologikal, ketahanan korosi dan oksidasi, dan biaya bahan baku yang rendah (Kobayashi, 2005). Paduan Fe-Al-C *lightweight steel* yang mengandung Al sampai 9% menunjukkan penurunan densitas hingga 10% lebih (Frommeyer, 2000). Sayangnya paduan Fe-Al-C pada temperatur ruang menunjukkan gejala rapuh dengan nilai ketangguhan yang rendah (Jablonska, 2006). Baligidad (1996) melaporkan bahwa penambahan karbon pada Fe-Al dengan kadar Al antara 8,5-16% akan menghasilkan paduan dengan kekuatan yang lebih tinggi dan *machinability* yang lebih baik (Baligidad, 1998). Paduan Fe-Al-C dikembangkan untuk aplikasi struktur pada temperatur sampai dengan 873K (Sikka et al., (1993) and Prakash et al., 1991),.

Mengingat Indonesia adalah salah satu negara dengan cadangan Al terbesar di dunia (*environmentalchemistry.com*, 2008), maka upaya untuk me-

ngembangkan paduan ini menjadi sangat mendesak. Apalagi kebutuhan industri dalam negeri akan bahan *stainless steel* konvensional masih dipenuhi dengan import.

Penelitian mempunyai tujuan untuk membuat paduan Fe-1,26Al-1,05C dengan modifikasi proses yang dapat dilaksanakan oleh IKM Pengecoran Logam, mempelajari sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Fe-1,26Al-1,05C. Untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur dalam paduan biner terhadap fasa  $\gamma$  yang dihasilkan, dapat mengacu pada daftar periodik unsur-unsur (Leslie, 1983). Unsur-unsur yang berperan sebagai pembentuk struktur ferit disebut sebagai Cr equivalent dan unsur-unsur yang berperan sebagai pembentuk struktur austenit disebut sebagai Ni equivalent (Honeycombe, 1995) yang secara umum dirumuskan sebagai berikut :  
Cr equivalent = (Cr) + 2(Si) + 1,5(Mo) + 5(V) + 5,5(Al) + 1,75(Nb) + 1,5(Ti) + 0,75(W)  
Ni equivalent = (Ni) + (Co) + 0,5(Mn) + 0,3(Cu) + 25(N) + 30(C)

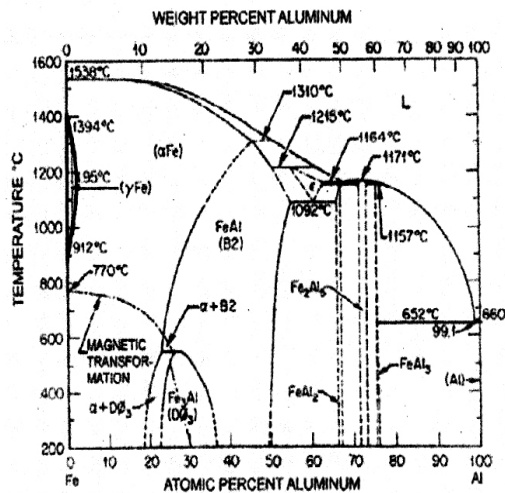
Hubungan antara Cr equivalent dan Ni equivalent digambarkan dalam diagram Schaeffler (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram Schaeffler (Honeycombe, 1995)

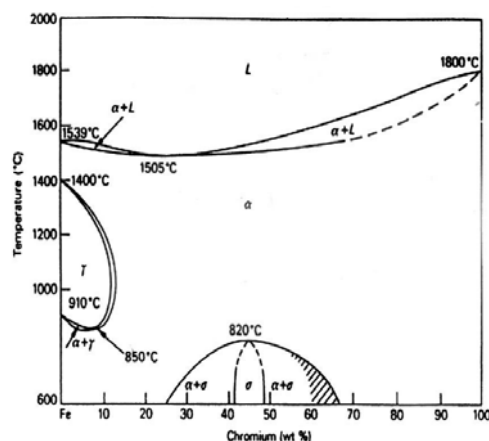
Unsur paduan yang mempunyai perilaku seperti Cr dalam sistim paduan biner Fe-Cr adalah Al. Diagram kesetimbangan Fe-Al (Gambar 2) memperlihatkan kemiripan dengan diagram kesetimbangan Fe-Cr (Gambar 3) Dari daftar periodik unsur-unsur, juga dapat diketahui

bahwa Al mempunyai *gamma loop* (loop  $\gamma$ ) seperti Cr.



Gambar 2. Diagram Kesetimbangan Fe-Al (Chao, 2002)

Kelarutan Al dalam  $\gamma$ -Fe sangat kecil dibandingkan Cr (Avner, 1987). Hal ini berarti, Al hanya dapat ditambahkan dalam jumlah yang sangat terbatas.



Gambar 3. Diagram kesetimbangan Fe-Cr (Leslie, 1983)

Aluminium adalah logam reaktif yang dapat membentuk lapisan pelindung aluminium-oksida. Lapisan tersebut mempunyai sifat yang sangat stabil dalam lingkungan netral dan asam, tetapi rentan dalam lingkungan alkali (Fontana, 1988). Paduan Al (*Al alloy*) telah secara luas digunakan dalam industri, tetapi dalam *stainless steel* konvensional, Al hanya ditambahkan dalam jumlah yang ke-

cil. Sistem paduan Fe-Al bersifat feritik pada semua temperatur (setara dengan Fe-Cr *stainless steel*). Fasa  $\gamma$  muncul dalam area yang sangat sempit pada penambahan Al dalam jumlah kecil ( $\pm 2\%$ ) mulai temperatur 912°C sampai dengan 1394°C.

Pada proses pendinginan lambat fasa  $\gamma$  dalam sistem paduan yang mengandung Al rendah dan C tinggi akan terdekomposisi membentuk fasa eutektik. Sedangkan pada pendinginan cepat akan tertransformasi membentuk struktur martensit.

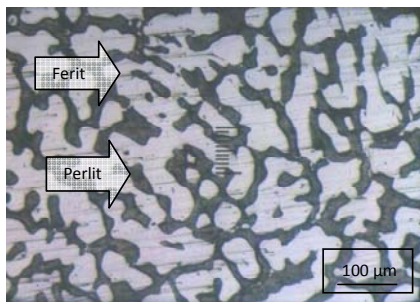
Menurut Davidson dkk. (1988), penambahan Mn pada *stainless steel* konvensional dalam jumlah besar akan menurunkan sifat-sifat paduan, tetapi dalam jumlah yang sedang akan mempunyai pengaruh yang menguntungkan, karena Mn akan berinteraksi dengan S membentuk Mn-sulfida yang akan berperan dalam meningkatkan ketahanan korosi, khususnya terhadap *pitting corrosion*. Sistem paduan Fe dengan 28-30% Mn, 8-10% Al dan 0,8-1% C di atas 850°C mempunyai struktur austenit lewat jenuh, dengan pemanasan 350-700°C struktur austenit akan terdekomposisi membentuk fasa  $\kappa$  (Fe,Mn)<sub>3</sub>AlC yang akan meningkatkan kekuatan luluh secara signifikan.

Peleburan menggunakan dapur induksi frekwensi tinggi kapasitas 50 kg milik POLMAN Ceper, Klaten, Jawa Tengah dengan *alloying* dilakukan di dalam *ladle*. Bahan baku peleburan menggunakan scrap baja rendah Mn, aluminium murni dan Ferro-karbon. Coran dibuat dalam bentuk ingot dengan ukuran 3cm x 3cm x 20cm. Target komposisi yang akan dicapai adalah Fe-1,52% berat Al-1,44% berat C. Perhitungan komposisi secara manual dilakukan dengan *material balance* dengan toleransi kehilangan Al sebesar 15%. Ingot paduan Fe-Al-C selanjutnya dipotong menggunakan *meta-cut* dibentuk menjadi specimen uji tarik berdasarkan standard JIS 2201, specimen uji kekerasan dan specimen uji korosi dengan ukuran diameter 14 mm tinggi 10 mm. Proses *heat treatment* terdiri dari *hardening* yaitu pemanasan sampai temperatur 900°C selama 1 jam dilanjutkan *quenching* dalam media air.

Proses temper dilakukan pada temperatur 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C selama 1 jam. Uji korosi dilakukan dengan metoda kehilangan berat berdasar standar ASTM G31.

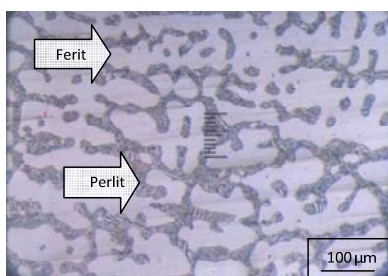
### PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast*, terlihat bahwa struktur paduan terdiri dari ferit dan perlit yang terdistribusi merata dengan jumlah yang hampir seimbang. Terlihat adanya pola dendritik dalam jumlah yang sangat kecil. Perubahan yang mencolok terjadi setelah austenitisasi pada temperatur 900°C.



Gambar 4. Struktur mikro paduan paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast*

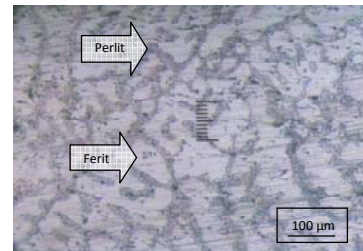
Struktur ferit mendominasi dengan ukuran butir yang besar-besaran sedangkan struktur perlit tersisa sedikit di bagian batas butir ferit (Gambar 5).



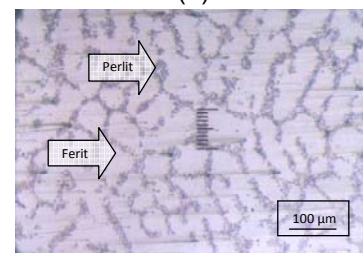
Gambar 5. Struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C setelah hardening 900°C

Struktur perlit semakin berkurang dengan semakin tinggi temperatur temper dan pada temperatur temper 450°C struktur ferit hampir sempurna (gambar 6). Hal ini membuktikan peran Al sebagai

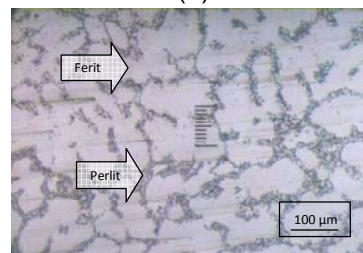
penstabil struktur ferit pada paduan Fe-1,52Al-1,44C.



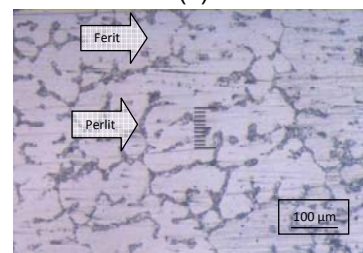
(a)



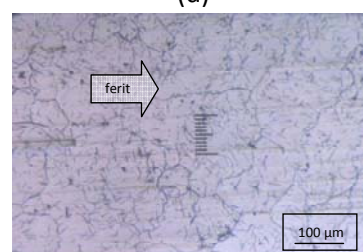
(b)



(c)



(d)

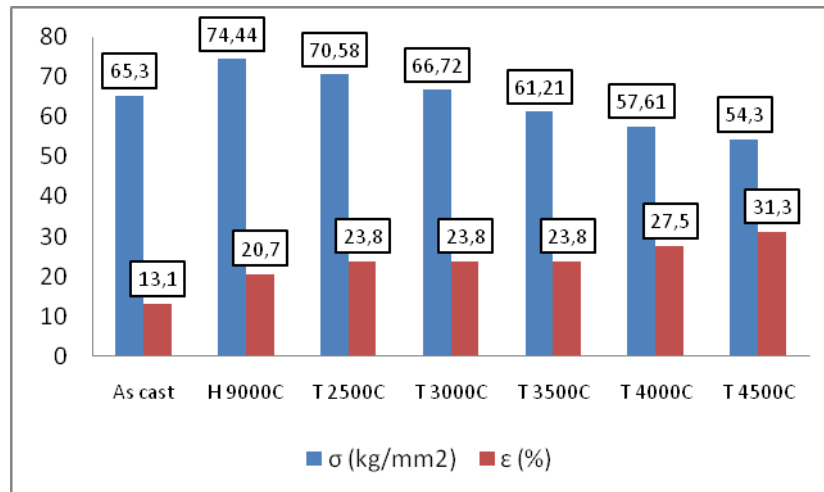


(e)

Gambar 6. Struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C (a) temper 250°C, (b) temper 300°C, (c) temper 350°C, (d) temper 400°C, (e) temper 450°C

Hasil uji kekuatan tarik menunjukkan bahwa paduan Fe-1,52Al-1,44C mempunyai kekuatan tarik sebesar 65,3 kg/mm<sup>2</sup> (Gambar 7) dengan regangan ( $\epsilon$ ) sebesar 13,1%. Nilai kekuatan tarik ini cukup tinggi jika dibandingkan dengan kekuatan tarik baja tahan karat feritik Fe-Cr-C yaitu berkisar 45-50 kg/mm<sup>2</sup> (AZ-

oM™.com, 2009). Hal ini disebabkan kadar karbon yang tinggi dan adanya senyawa intermetalik Fe-Al yang berperan dalam peningkatan kekuatan paduan. Akan tetapi diikuti dengan nilai regangan relatif sangat rendah.

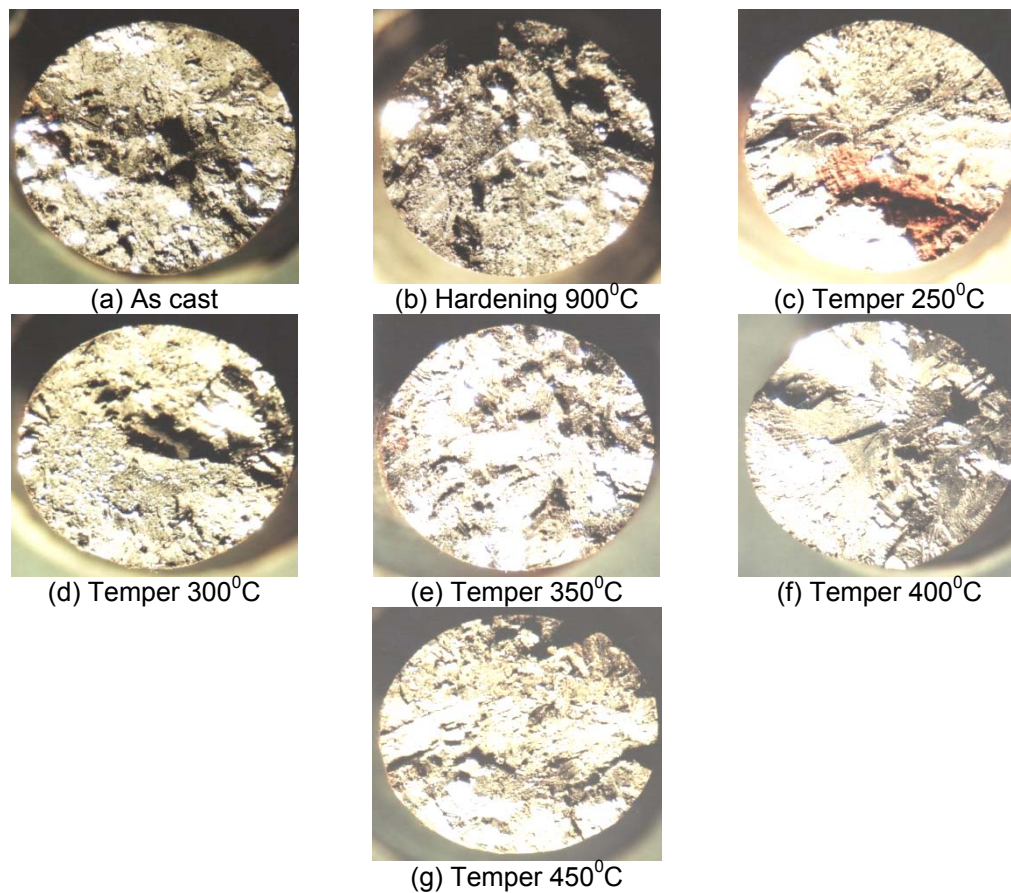


Gambar 7. Pengaruh temperatur temper terhadap kekuatan tarik dan regangan paduan Fe-1,52Al-1,44C

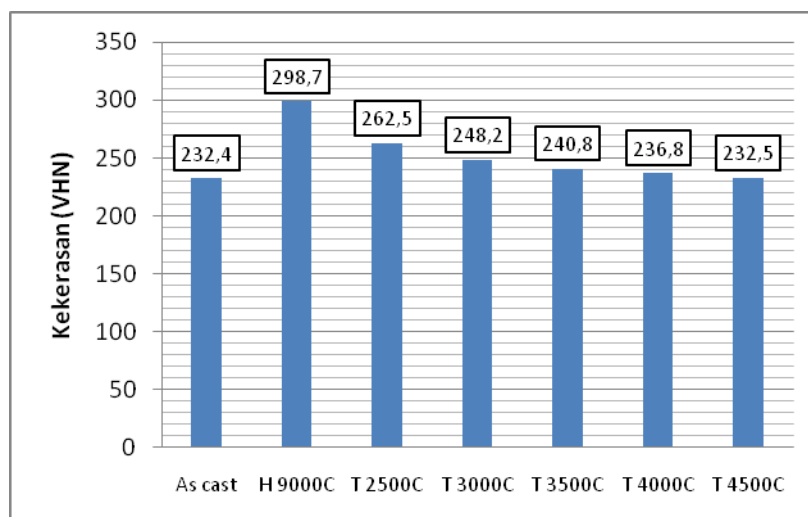
Setelah *hardening* terlihat kekuatan tarik meningkat menjadi 74,44kg/mm<sup>2</sup> yang diikuti dengan peningkatan regangan menjadi 20,7%. Fenomena ini disebabkan terjadinya perubahan struktur yang sangat mencolok dimana struktur ferit dengan ukuran yang besar lebih mendominasi dikelilingi struktur perlit dengan jumlah yang relatif lebih kecil. Pengurangan senyawa intermetalik Fe-Al setelah *hardening* berperan dalam peningkatan regangan. Proses temper akan menurunkan kekuatan. Semakin tinggi temperatur temper kekuatan tarik semakin menurun hingga mencapai nilai minimal sebesar 54,3kg/mm<sup>2</sup>. Fenomena ini disebabkan semakin tinggi temperatur temper maka struktur paduan Fe-1,52Al-1,44C akan cenderung menjadi lebih feritik. Transisi getas-ulet paduan Fe-1,52Al-1,44C dapat dilihat dari permukaan patah

spesimen uji tarik pada Gambar 8. Dari gambar 8 (b) terlihat bentuk patahan getas tanpa ada bibir atau corong (cone), dan pada gambar 8 (c), (d) dan (e) terlihat adanya bibir patahan dan semakin memanjang pada gambar 8 (f) dan (g)

Gambar 9. menunjukkan bahwa paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* mempunyai nilai kekerasan sebesar 232,4 VHN. Nilai kekerasan tertinggi terjadi setelah *hardening* yaitu sebesar 298,7 VHN. Semakin tinggi temperatur temper kekerasan paduan Fe-1,52Al-1,44C semakin menurun hingga mencapai nilai minimal pada temper 450°C yaitu sebesar 232,5 VHN. Fenomena ini sesuai dengan fenomena yang terjadi pada struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C, dimana dengan kenaikan temperatur temper terjadi kecenderungan perubahan struktur menjadi lebih feritik.



Gambar 8. Foto makro permukaan patah spesimen uji tarik paduan Fe-1,52Al-1,44C



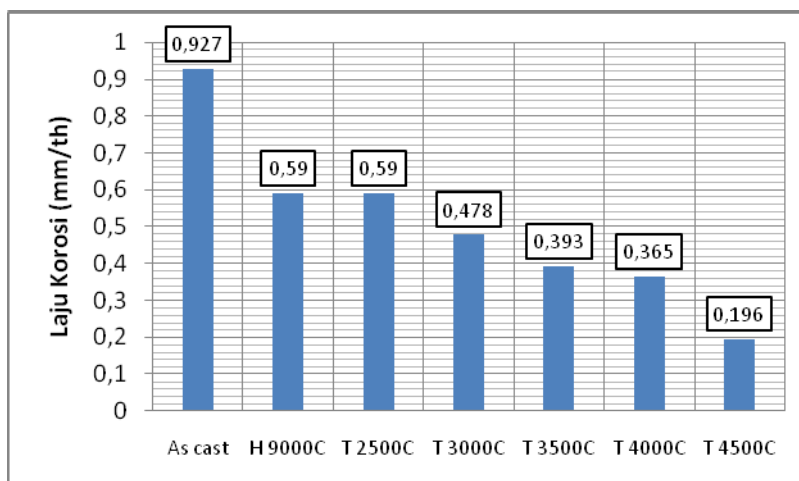
Gambar 9. Pengaruh temperatur temper terhadap kekerasan paduan Fe-1,52Al-1,44C

Perhitungan laju korosi dilakukan dengan metoda kehilangan berat. Paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* mempunyai laju korosi sebesar 0,927 mm/th ter-

masuk katagori cukup baik berdasarkan Tabel 1 (tabel MPY) (Fontana, 1987). Laju korosi akan semakin menurun dengan naiknya temperatur temper dan

mencapai nilai minimal pada temper 450°C dengan laju korosi sebesar 0,196 mm/th. Jika dianalisis dari perubahan yang terjadi pada struktur mikro akibat proses *heat treatment* maka penurunan jumlah perlit yang terjadi cenderung menurunkan laju korosi pada paduan Fe-

1,52Al-1,44C Berdasarkan tabel 1 laju korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C setelah temper pada temperatur 300°C sampai 450°C termasuk dalam katagori baik. Hasil tersebut dapat dilihat pada gambar 10 berikut.



Gambar 10. Pengaruh temperatur temper terhadap ketahanan korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C

Tabel 1. Tingkat ketahanan korosi berdasarkan harga MPY

Tingkat ketahanan korosi	MPY	Konversi kesatuan-satuan lain			
		mm/tahun	$\mu$ m/tahun	nm/tahun	$\mu$ m/tahun
Luar biasa	<1	<0.02	<25	<2	<1
Sangat baik	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Baik	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	5-20
Cukup baik	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Kurang baik	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Tidak dianjurkan	200+	5+	5000+	500+	200+

Sumber : Fontana, 1987

### KESIMPULAN

Struktur paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* terdiri dari ferit dan perlit yang terdistribusi merata dan dalam jumlah yang sangat kecil struktur dendrit. Semakin tinggi temperatur temper struktur berubah menjadi lebih feritik. Kekuatan tarik paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* sebesar 65,3 kg/mm<sup>2</sup> dengan regangan sebesar 13,1%. Kekuatan tarik maksimal terjadi setelah *hardening* dan akan me-

nurun dengan semakin tinggi temperatur temper. Nilai kekerasan paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* sebesar 232,4VHN. Nilai kekerasan tertinggi terjadi setelah *hardening* dan akan semakin menurun dengan semakin tinggi temperatur temper. Laju korosi tertinggi terjadi pada paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* yaitu 0,927 mm/th dan semakin menurun dengan semakin tinggi temperatur temper. Laju korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C setelah temper pada temperatur 300°C-450°C termasuk kategori baik.

### DAFTAR PUSTAKA

- Avner, H.S., 1987, *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Baligidad, R.G., Prakash, U., Ramakrishna Rao, V., Rao, P.K., and Ballal N.B., 1996, Effect of Carbon Content on Mechanical Properties of Electroslog Remelted Fe<sub>3</sub>-Al Based Intermetallic alloys, *Journal of Material Science and Teschnology*, Vol. 36, No. 12, 1453-1458.

- Baligheid, R.G., Prakash, U., and Radha Krishna, 1998, Effect of Carbon Addition on Structure and Mechanical Properties of Electroslag Remelted Fe-20wt.%Al alloy, *Journal of Material Science and Technology*, Vol. 249, No. 1-2, 97-102.
- Chao, Y.C., and Liu, C.H., 2002, Effect of Mn Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-10Al-xMn-1.0C Alloy, *Materials Transactions*, Vol. 3, No. 10, pp. 2635-2642.
- Davidson, R.M., DeBold, T. dan Johnson, M.J., 1988, *Corrosion of Stainless Steel*, dalam ASM Handbook, Metals Park, Ohio
- Environmentalchemistry.com, 2008, Environmental, *Chemistry & Hazardous Materials News, Careers & Resources*, Periodic Table of Elements.
- Fontana, G.M., 1988, *Corrosion Engineering*, 3th ed., McGraw Hill Inc., Singapore.
- Frommeyer, 2000, *Physical and Mechanical Properties of Iron-Aluminium-(Mn-Si) Lightweight Steels*, The 1999 ATS International Steelmaking Conference, Paris. Sec.4.
- Honeycombe, R.W.K. dan Bhadeshia, H.K.D., 1995, *Steel Microstructure and Properties*, 2<sup>nd</sup> ed., Edward Arnold, London.
- Huang, B.X., Wang, X.D., Rong, Y.H., Wang, L., and Jin, L., 2006, Mechanical Behavior and Martensitic Transformation of an Fe-Al-Si-Al-Nb Alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 438-440, p. 306-311.
- Kobayashi, S., Zaefferer, S., Schneider, A., Raabe, D., and Frommeyer, G., 2005, Optimisation of Precipitation for Controlling Recrystallization of Wrought Fe<sub>3</sub>Al Based Alloys, *Intermetallics*, 13, 12-96-1303.
- Leslie, T., 1983, *The Physical Metallurgy of Steels*, John Willey and Sons Inc., New York.
- Prakash, U. Buckley, R.A., Jones, H. and Sellars, C.M., 1991, Structure and Properties of Ordered Intermetallics Based on the Fe-Al System, *ISIJ Int.*, vol 31, no. 10, 1113-1126.
- Shackelford, J.F., 1992, *Introduction to Material Science for Engineers*, 3th ed., McMillan Publishing Company, New York.
- Sikka, V.K., Viswanathan, S., and McKamey, C.G., 1993, in 'Structural Intermetallic', (ed. R. Darolia et al.), Warrendale, PA, TMS. pp. 483-49.
- Tjong, S.C., 1986, Stress Corrosion Cracking behavior of the duplex Fe-10Al-29Mn-0.4C alloy in 20% NaCl solution at 100°C, *Journal of Material Science*, Vol. 21, Hal.: 1166-1170
- Wang, C. J. dan Duh, J. G., 1988, Nitriding in the high temperature oxidation of Fe-31Mn-9Al-6Cr alloy, *Journal of Materials science*, Vol. 23, Hal.: 769-775
- Wang, S., Zhang, H., dan Chen, S.J., 2000, Experiment on Fe-Al-Mn Deoxidizing and Alloying of Low-carbon Aluminium Killed Steel, *Journal Iron Steel Vanadium Titanium*, Vol. 21, No. 4., hal. 44-49.