



Peningkatan kekerasan dan ketahanan korosi paduan Fe-2,9Al-0,4C dengan proses karburisasi padat

Increased Hardness and Corrosion Resistance of Fe-2.9Al-0.4C by Solid Carburization Process

R. Kartikasari^{*}, A. Susiana, D. Ocktavian

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari no. 1, Caturtunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta 55281
E-mail: ratna@itny.ac.id

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 08 February 2020
Accepted 13 January 2021
Available online 01 April 2021

Keywords:

Fe-2.9Al-0.4C alloy
Solid carburization
Microstructure
Hardness
Corrosion resistance



Fe-Al-C alloy is a superior and economical new alloy to replace the ferritic stainless steel, whereas aluminum replaces chromium, which is relatively expensive. Some applications of Fe-Al-C alloys require hardness at the surface. This study aims to determine the effect of the temperature carburizing process on the hardness and corrosion resistance of Fe-2,9Al-0,4C alloys. Material used is Fe-2,9Al-0,4C steel alloy. Surface hardening using a solid carburizing method. The solid carburizing process carried out by the holding time for 3 hours at various temperatures of 850°C, 900°C, 950°C, 1000°C, and 1050°C. Carburized is used in the form of powder coal and MgCO₃ catalyst. Tests carried out are chemical composition, microstructure, hardness, and corrosion tests. The test results show that the chemical composition of the Fe-2,9Al-0,4C alloy contains elements of 2.91% Al and 0.40% C. Microstructure formed is ferrite and pearlite with a dendritic pattern. The martensitic structure formed at 950°C, 1000°C, and 1050°C. The Carburizing process increases the hardness value where the higher temperature carburizing process, the higher hardness values until it reaches a maximum temperature of 1050°C with a hardness value of 1040.5 kg/mm². The highest corrosion resistance value occurs after the 850°C carburizing process at a rate of 41.58 mpy corrosion (up 40.9% of the raw material). At a higher temperature carburizing process lowers the corrosion resistance of the alloy Fe-2,9Al-0,4C.

1. PENDAHULUAN

Baja merupakan paduan yang terdiri atas besi, karbon, dan unsur paduan lainnya yang ditambahkan untuk mendapatkan sifat-sifat khusus. *Stainless steel* atau biasa disebut dengan baja tahan karat adalah salah satu dari jenis logam yang memiliki ketahanan korosi yang baik saat ini. Material jenis ini secara luas digunakan di banyak industri karena sifatnya yang kuat dan tahan korosi (Sulaiman dkk, 2016).

Penggunaan *ferritic stainless steel* paduan Fe-Cr-C pada kehidupan manusia sudah di aplikasikan pada berbagai macam peralatan. Akan tetapi, dengan karakter yang dimilikinya, perlu dilakukan modifikasi untuk meningkatkan kekerasan maupun ketahanan korosinya. Pada penelitian ini modifikasi yang dilakukan adalah dengan mengganti paduan Fe-Cr-C dengan Fe-2,9Al-0,4C dimana unsur Cr (*chrom*) digantikan oleh unsur Al (aluminium). Baja paduan berbasis Fe-Al menarik banyak perhatian karena sifatnya yang luar biasa yaitu untuk aplikasi struktur pada temperatur tinggi. Densitasnya lebih rendah dibandingkan dengan material lainnya seperti besi cor dan baja tahan karat, ketahanan korosi yang baik pada suhu tinggi, tahan aus dan harganya yang murah. Karena harganya yang murah, baja jenis ini menjadi material alternatif yang potensial untuk menggantikan baja tahan karat konvensional (Peng dkk, 2019).

Baligheid dkk. (2007), melaporkan bahwa paduan Fe-10,5Al-0,7C mempunyai keuletan dan ketangguhan yang rendah. Sementara itu Kobayashi dkk. (2005) dan Jablonska dkk. (2006) mengatakan bahwa paduan Fe-Al-C dikembangkan untuk aplikasi struktur hingga temperatur 873°K. Giza dkk. (1999) melaporkan hasil penelitiannya bahwa paduan Fe-Al-C mempunyai ketahanan korosi yang baik dalam lingkungan netral tetapi terkorosi dengan cepat setara dengan besi tuang putih dalam lingkungan asam. Berbagaiupaya dilakukan untuk meningkatkan karakteristik paduan baru ini. Frommeyer (2000) melaporkan hasil penelitiannya yaitu bahwa penambahan Mn dalam sistem paduan Fe-Al akan menstabilkan struktur austenit dan akan dihasilkan paduan yang mempunyai *hot workability* dan keuletanyang baik. Rao (2004) menambahkan bahwa peningkatan kadar karbon dalam sistem Fe-Al-C dapat meningkatkan ketahanan oksidasi, tetapi efek negatif terjadi apabila peningkatan kadar karbon diikuti dengan penurunan kadar Al. Lebih jauh Baligheid (2007), melaporkan bahwa penambahan 2% unsur Mn dan Mo, dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan, sedangkan penambahan 2% unsur Si terbukti dapat meningkatkan kekuatan tarik paduan Fe-10,5Al-0,7C tetapi paduan menjadi sangat rapuh pada temperatur ruang.

Penambahan Mn bersama karbon (C) dalam paduan Fe-Al juga diyakini mampu memperluas dan menstabilkan daerah austenit, sehingga paduan yang dihasilkan akan mempunyai sifat-sifat mekanik yang baik pada temperatur tinggi (Banerji, 1982). Baja paduan Fe-Mn-Al-C dengan kandungan Al yang tinggi menawarkan kombinasi yang sangat baik untuk densitas massa yang rendah, meningkatkan ketahanan korosi, kekuatan yang tinggi dan keuletan yang baik (Seol, 2018).

Aplikasi baja paduan Fe-Al-C pada beberapa komponen seperti *camp shaft*, menyaratkan kekerasan permukaan dan ketahanan korosi yang tinggi. Sehingga perlu dilakukan proses perlakuan permukaan dan menurut Campagnolo dkk. (2019), beberapa dekade terakhir, perlakuan permukaan dan pelapisan telah dikembangkan pada komponen mekanis untuk beberapa kondisi seperti beban, keausan, dan korosi. Perlakuan permukaan dapat diklasifikasikan kedalam perlakuan permukaan mekanis (*shot peening dan deep rolling*), *thermal(quenching dan tempering*) dan difusi (*carburizing, nitriding, carbonitriding dan nitrocarburizing*). Karburisasi (*carburizing*) adalah proses termokimia (*chemical heat treatment*) permukaan baja dengan karbon sehingga atom karbon aktif akan berdifusi masuk ke permukaan baja. Tujuan utama dari proses karburisasi adalah untuk mendapatkan suatu permukaan yang keras dan tahan aus pada bagian-bagian mesin dengan menambahkan karbon pada lapisan permukaan (Ahmad, 2015). Berdasarkan sumber karbon, karburisasi diklasifikasikan karburisasi padat (*pack carburizing*), karburisasi gas (*gas carburizing*), karburisasi cair (*liquid carburizing*) (Supriyono, 2018). *Pack carburizing* (karburisasi padat) adalah proses penambahan unsur karbon ke permukaan logam, dimana sumber unsur karbon dalam keadaan padat seperti arang, kokas, dan batubara, sehingga dapat meningkatkan angka kekerasan pada permukaan (Darmo dkk., 2018). Proses karburisasi padat merupakan proses karburisasi konvensional yang dapat dilakukan dengan mudah dan dengan biaya yang relative murah (Smith, 2002).

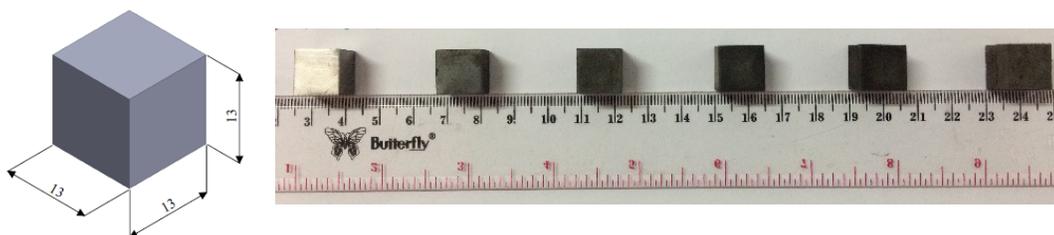
2. METODE PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah coran paduan Fe-2,9Al-0,4C dalam bentuk ingot berukuran 30 x 30 x 200 mm. Ingot paduan Fe-2,9Al-0,4C sebelumnya dilakukan uji komposisi menggunakan spectrometer. Ingot ini selanjutnya dipotong menjadi berukuran 13 x 13 x 13 mm

sebagai bahan yang akan dilakukan proses karburisasi. *Carburizer* yang digunakan adalah serbuk batu bara dan 15% katalis $MgCO_3$. Proses karburisasi dilakukan dengan metode karburisasi padat (*pack carburizing*) dimana *carburizer* yang berupa serbuk batubara dicampur dengan katalis $MgCO_3$. Proses karburisasi padat dilakukan menggunakan wadah keramik berukuran 10x10x10 cm, dimana coran paduan Fe-2,9Al-C dikemas diposisikan ditengah ruang dengan dikelilingi *carburizer*. Selanjutnya wadah yang sudah siap dengan specimen di dalamnya, dimasukkan ke dalam dapur dan dipanaskan pada temperatur austenit yang divariasikan yaitu 850°C, 900°C, 950°C, 1000°C, dan 1050°C, masing-masing selama 3 jam dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat dengan cara dicelup di dalam air. Setelah proses karburisasi specimen dipotong melintang dan dilanjutkan dengan pengamplasan dan pemolesan untuk dilakukan analisis distribusi kekerasan dan pengujian struktur mikro. Specimen uji struktur mikro terlebih dahulu di etsa menggunakan HNO_3 0,5%. Perubahan struktur mikro yang terjadi di amati menggunakan mikroskop optik pada tiga titik dari permukaan hingga ke dalam. Pengujian distribusi kekerasan specimen terkarburisasi dilakukan dari permukaan ke dalam benda uji pada 10 titik uji. Pengujian korosi dilakukan dengan metoda kehilangan berat pada permukaan specimen setelah dikarburisasi. Permukaan specimen terlebih dulu diamplas dan dipoles permukaannya, kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital selanjutnya direndam dalam larutan HCl 5% selama 100 jam, setelah perendaman specimen dibersihkan dan ditimbang kembali untuk dicari selisih beratnya dan dihitung laju korosinya menggunakan rumus Fontana (1988).



Gambar 1. Ingot coran paduan Fe-2,9Al-0,4C berukuran 30 x 30 x 200 mm



Gambar 2. Spesimen karburisasi paduan Fe-2,9Al-0,4C

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui unsur yang terkandung dalam specimen paduan Fe-2,9Al-0,4C menggunakan alat uji spektrometer. Data hasil pengujian komposisi kimia paduan dapat dilihat pada Tabel 1.

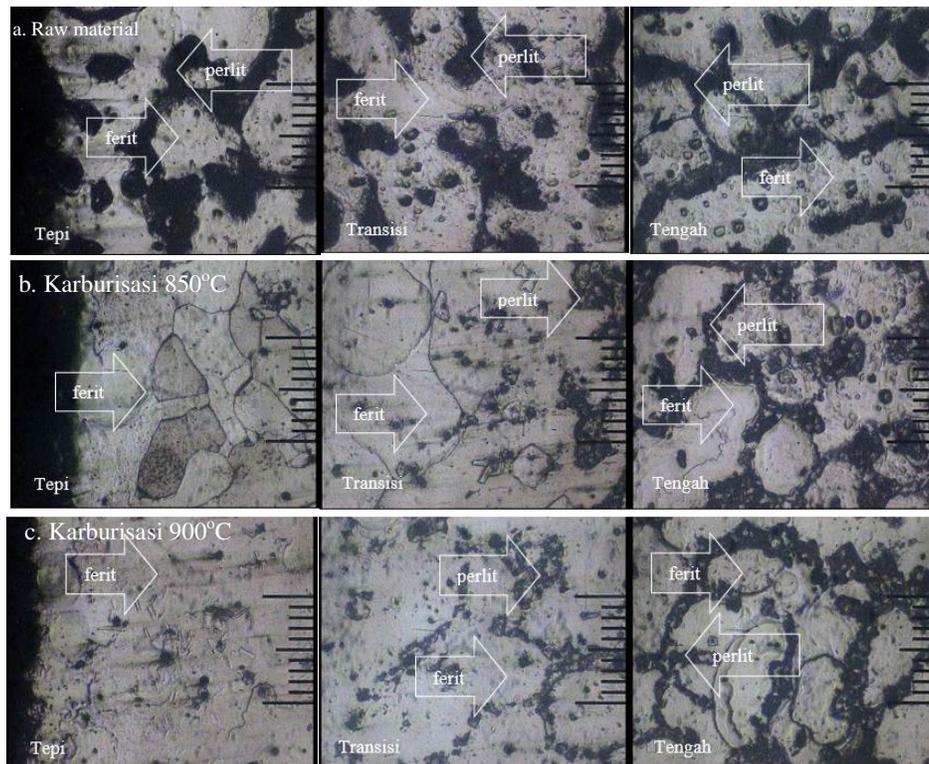
Tabel 1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia paduan Fe-2,9Al-0,4C

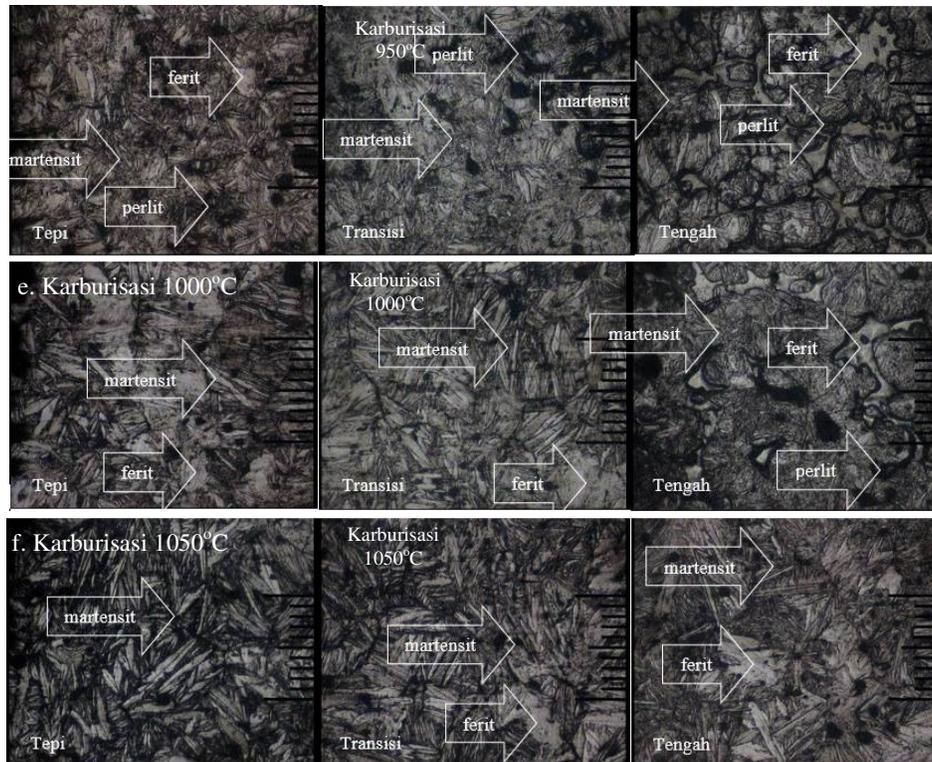
Unsur	Fe	C	Al	Si	Mn	S	P
Kadar(% berat)	95,38	0,4	2,91	0,98	0,25	0,05	0,03

Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa jumlah kandungan unsur dalam paduan Fe-2,9Al-0,4C adalah (Al) 2,91%, dan (C) 0,40%. Penambahan unsur (Al) sebesar 2,91% berfungsi sebagai pembentuk dan penstabil struktur ferit (Frommeyer, 2000), serta dapat meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi. Unsur C yang cukup tinggi yaitu sebesar 0,40% mendorong terbentuknya struktur perlit yang akan meningkatkan kekerasan. Unsur Si yang jumlah kandungannya 0,98% mampu menaikkan tegangan tarik dan menurunkan laju pendinginan tetapi dalam jumlah yang besar dapat mengurangi sifat kemagnetan pada paduan. Unsur-unsur yang lain jumlahnya sangat kecil sehingga tidak berpengaruh secara signifikan terhadap sifat paduan Fe-2,9Al-0,4C. Baja paduan ini termasuk baja paduan menengah karena jumlah total kandungan unsur paduan sebesar 4,62%.

3.2 Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik pada bagian tepi yaitu sisi yang terdekat dengan permukaan, bagian transisi yaitu bagian antara tepi dan tengah, dan bagian tengah yaitu bagian tengah specimen, dari permukaan potong melintang specimen setelah proses karburisasi. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan perbesaran 100x, tujuannya adalah untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi dari permukaan hingga bagian dalam akibat adanya difusi atom karbon ke dalam specimen selama proses karburisasi. Specimen uji terdiri atas specimen *raw material* dan specimen hasil proses karburisasi padat yang dilakukan dalam waktu tahan 3 jam dengan variasi temperatur 850°C, 900°C, 1000°C dan 1050°C. Hasil pengujian struktur mikro permukaan potong specimen hasil proses karburisasi dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil pengujian struktur mikro pada Gambar 3a. menunjukkan bahwa paduan Fe-2,9Al-0,4C memiliki struktur ferit dan perlit. Terlihat jelas fungsi unsur Al sebagai pembentuk dan penstabil struktur ferit sehingga pada kadar C yang medium struktur ferit terlihat dominan, struktur perlit yang terlihat menunjukkan fungsi unsur C yang mendorong terbentuknya struktur perlit.





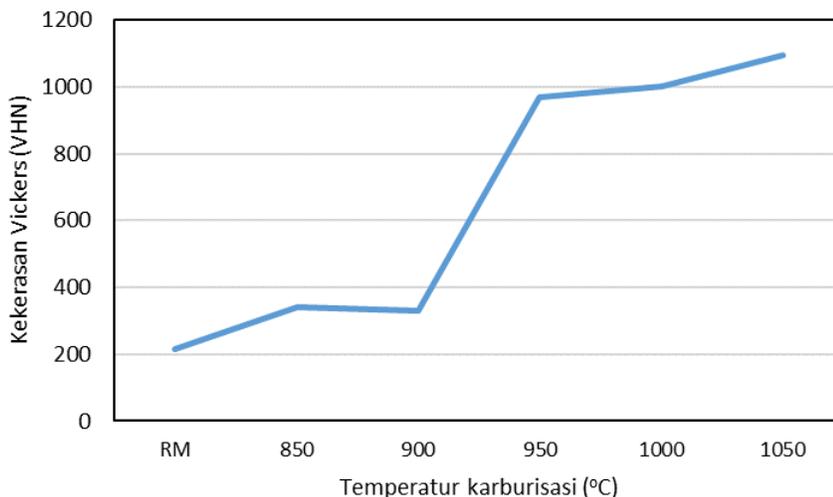
Gambar 3. Srtuktur mikro paduan Fe-2,9Al-0,4Csebelum dan sesudah proses karburisasi

Setelah proses karburisasi pada temperatur 850°C (Gambar 3b) terlihat bahwa pada permukaan hanya terlihat struktur ferit sedangkan struktur perlit tidak terlihat sama sekali. Pada bagian transisi mulai terlihat adanya struktur perlit di bagian yang lebih dalam. Semakin ke dalam struktur perlit semakin banyak. Pada temperatur ini belum terlihat munculnya struktur martensit yang diharapkan terbentuk di permukaan. Hal ini disebabkan proses austenitisasi paduan Fe-Al belum terjadi sehingga unsur karbon belum dapat terdifusi masuk ke permukaan paduan selama proses karburisasi. Disamping itu pada temperatur ini peruraian unsur karbon dari *carburizer* juga belum terjadi sehingga belum terlihat unsur karbon yang masuk ke permukaan paduan. Hal yang hampir sama terjadi pada karburisasi dengan temperatur 900°C (Gambar 3c), akan tetapi struktur perlit sudah terlihat lebih banyak terbentuk dan tersebar di batas butir pada bagian transisi dan tengah.

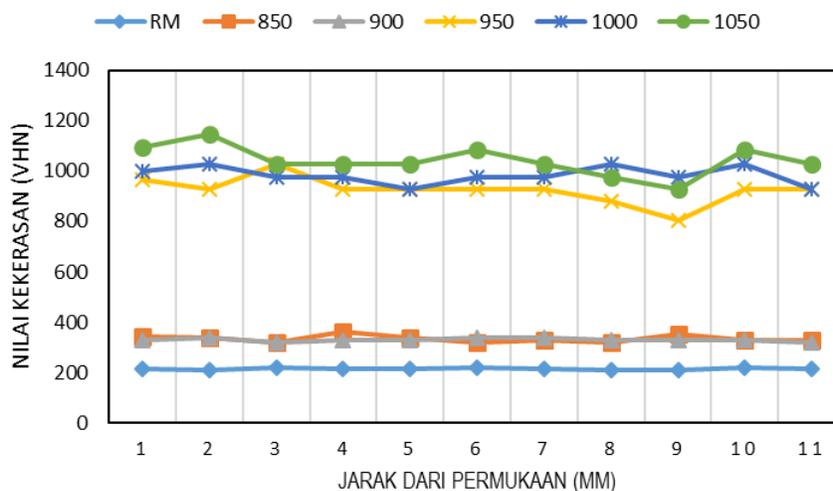
Struktur mikro hasil proses karburisasi pada temperatur 950°C (Gambar 3d) pada bagian permukaan terlihat sekali adanya struktur martensit yang mendominasi, sebagian kecil struktur ferit dan perlit, bahkan sampai bagian transisi. Hal ini menunjukkan austenitisasi sudah tercapai dan peruraian karbon pada *carburizer* juga sudah terjadi sehingga proses difusi karbon ke dalam baja paduan bisa berjalan sempurna selama proses karburisasi. Proses *quenching* merubah struktur perlit menjadi martensit. Peningkatan jumlah struktur martensit terus terjadi sampai dengan karburisasi pada temperatur 1050°C (Gambar 3f), hal ini disebabkan atom karbon yang terdifusi ke dalam spesimen semakin banyak dan semakin dalam masuk ke dalam baja dengan semakin tinggi temperatur. Pada bagian tepi terlihat struktur martensit lebih padat dan dominan, di bagian transisi terlihat struktur martensit berkurang tetapi tidak signifikan demikian selanjutnya sampai bagian dalam. Hal ini menunjukkan atom karbon yang masuk ke dalam baja terdistribusi hampir merata semakin ke dalam terjadi pengurangan atom karbon tetapi tidak signifikan, semakin ke dalam struktur martensit masih terlihat dominan dengan butiran yang terlihat lebih besar. Hal ini disebabkan atom karbon membutuhkan energi yang lebih besar untuk menembus sampai ke dalam susunan atom-atom Fe. Keberadaan unsur Al yang cukup tinggi diduga dapat meningkatkan difusifitas atom karbon sehingga dapat menyisip lebih dalam dan mendorong pembentukan karbida di permukaan.

3.3 Analisis Hasil Pengujian Distribusi Kekerasan

Pengujian kekerasan pada setiap spesimen dilakukan menggunakan metode *Micro Vickers* sebanyak 5 titik pada permukaan dan 10 titik dari tepi ke tengah dengan jarak antar titik 0,5 mm.



Gambar 4. Kekerasan permukaan paduan Fe-2,9Al-0,4C



Gambar 5. Distribusi kekerasan paduan Fe-2,9Al-0,4C

Hasil uji kekerasan paduan Fe-2,9Al-0,4C (Gambar 4) menunjukkan bahwa harga kekerasan untuk spesimen *raw material* sebesar 215,3 kg/mm², dimana struktur mikro terdiri dari struktur ferit dan perlit dengan pola dendritik. Pada proses karburisasi 850°C dan 900°C terjadi peningkatan nilai kekerasan tetapi tidak signifikan, hal ini disebabkan struktur ferit dan perlit masih mendominasi belum terbentuk struktur martensit di permukaan. Karena pada temperatur tersebut proses austenitisasi paduan Fe-2,9Al-0,4C belum terjadi, sehingga karbon (C) tidak dapat terdifusi masuk ke dalam Fe. Pada proses karburisasi 950°C, 1000°C, dan 1050°C terjadi peningkatan kekerasan yang signifikan, hal ini disebabkan karena pada temperatur ini terjadi proses austenitisasi pada paduan Fe-2,9Al-0,4C (912°C - 1394°C), sehingga atom karbon (C) dari batu bara terdifusi masuk ke dalam Fe dan ketika dilakukan proses *quenching* terbentuklah struktur martensit. Selain terbentuk struktur

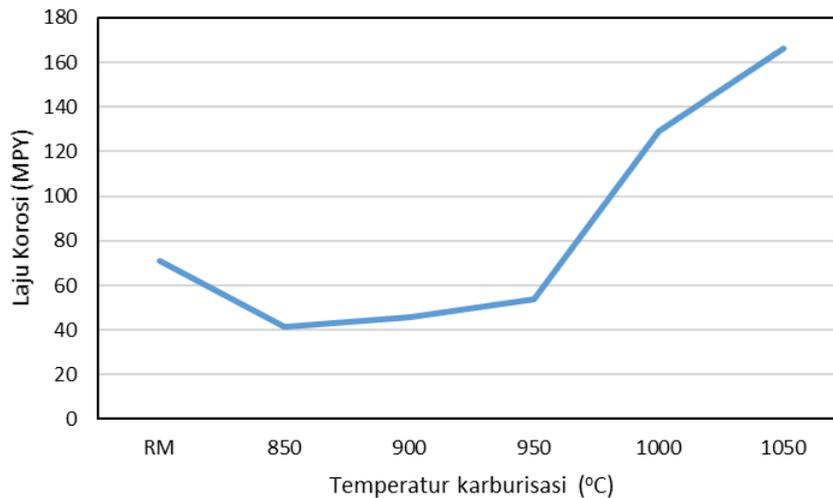
martensit unsur karbon (C) akan terikat pada Fe dan Al membentuk karbida Fe dan karbida Al yang menyebabkan terjadinya peningkatan kekerasan yang signifikan.

Keseluruhan data yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur proses karburisasi harga kekerasan akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi temperatur maka jarak antar butir akan semakin besar, dimana unsur karbon (C) yang masuk juga akan semakin banyak. Spesimen yang mengalami perlakuan panas di temperatur austenisasi memiliki nilai kekerasan yang lebih besar daripada kekerasan spesimen yang mengalami perlakuan panas di bawah temperatur austenisasi. Hal tersebut disebabkan karena struktur martensit lebih mendominasi, sehingga nilai kekerasan meningkat. Nilai kekerasan yang semakin meningkat dengan perlakuan karburisasi dan *quenching* menunjukkan bahwa paduan Fe-Al 2,9-0,4C dapat dikeraskan (Kartikasari, 2015).

Hasil uji distribusi kekerasan (Gambar 5) menunjukkan bahwa pada specimen sebelum proses karburisasi dan setelah karburisasi pada temperatur 850°C dan 900°C tidak ada gradien nilai kekerasan dari permukaan sampai ke dalam, hal ini disebabkan belum terjadinya proses difusi karbon ke permukaan paduan Fe-2,9Al-0,4C sehingga tidak terbentuk martensit di permukaan. Proses karburisasi pada temperatur mulai 950°C sampai dengan 1050°C menyebabkan terjadinya peningkatan kekerasan di permukaan dan semakin ke dalam terjadi penurunan nilai kekerasan tetapi tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa difusi atom karbon ke dalam paduan terjadi secara maksimal sehingga kekerasan relatif sama di permukaan hingga ke dalam. Kenyataan ini juga diperkuat oleh hasil uji struktur mikro dimana struktur martensit hampir merata sampai ke dalam.

3.4 Analisis Hasil Pengujian Korosi

Pengujian korosi ini dilakukan menggunakan metode kehilangan berat di dalam media larutan HCl dengan kadar 5%. Spesimen direndam dalam larutan HCl 5% selama 100 jam, sebelumnya specimen ditimbang. Penimbangan dilakukan lagi setelah perendaman 100 jam dengan terlebih dahulu specimen dibersihkan menggunakan alkohol dan dikeringkan. Selisih berat sebelum dan sesudah perendaman menjadi dasar perhitungan laju korosi.



Gambar 6. Laju korosi baja paduan Fe-2,9Al-0,4C

Hasil uji korosi (Gambar 6) menunjukkan bahwa laju korosi terendah terjadi pada paduan Fe-2,9Al-0,4C setelah proses karburisasi pada temperatur 850°C, semakin tinggi temperatur proses karburisasi laju korosi semakin meningkat dengan laju korosi tertinggi sebesar 166,3 MPY. Dengan kata lain ketahanan korosi tertinggi dicapai oleh paduan Fe-2,9Al-0,4C setelah proses karburisasi pada temperatur 850°C dengan laju korosi sebesar 41,58 MPY. Berdasarkan Tabel 2 laju korosi terendah termasuk dalam kategori cukup baik, sedangkan laju korosi tertinggi termasuk kategori kurang baik.

Proses karburisasi dapat menurunkan laju korosi raw material dari 70,68 MPY menjadi 41,58 MPY atau terjadi penurunan sebesar 40,9%. Hal ini disebabkan terbentuknya lapisan oksida

aluminium pada permukaan baja setelah karburisasi pada 850°C sehingga laju korosi terhambat (Kartikasari, 2014). Hal ini tidak terjadi pada saat unsur karbon sudah mulai masuk terdifusi ke permukaan baja dan membentuk struktur martensit. Struktur martensit menyebabkan laju korosi meningkat kembali bahkan sangat tinggi hingga 134%. Hal ini disebabkan internal stress yang terjadi pada struktur martensit menjadi awal terjadinya korosi sekaligus mempercepat terjadinya proses korosi.

Tabel 2. Tingkat ketahanan korosi berdasarkan harga *mpy*

Tingkat ketahanan korosi	<i>mpy</i> (<i>mils per year</i>)	Konversi satuan lain			
		mm/tahun	μ/tahun	nm/tahun	pm/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

Sumber: Corrosion Engineering, Fontana (1988)

4. KESIMPULAN

1. Hasil uji struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-2,9Al-0,4C memiliki struktur ferit dan perlit yang berpola dendritik. Struktur martensit mulai terbentuk di permukaan baja pada temperatur proses karburisasi 950°C dan semakin banyak hingga temperatur 1050°C.
2. Hasil uji kekerasan menunjukkan paduan Fe-2,9Al-0,4C memiliki kekerasanebesar 215,3 VHN. Nilai kekerasan meningkat dengan proses karburisasi padat dimana nilai kekerasan tertinggi sebesar 1040,5 VHN dicapai pada temperatur 1050°C.
3. Hasil pengujian ketahanan korosi menunjukkan bahwa, *raw material* memiliki ketahanan korosi sebesar 70,68 *mpy*, ketahanan korosi paling tinggi terjadi pada proses karburisasi padat dengan temperatur 850°C yaitu sebesar 41,58 *mpy* dan termasuk dalam katagori cukup baik. Semakin tinggi temperatur proses karburisasi ketahanan korosi semakin menurun.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis pada kesempatan ini mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah berperan serta sehingga penelitian ini dapat diselesaikan. Penulis memberikan apresiasi khusus kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Yogyakarta yang telah memberikan dukungan penuh hingga terselesaikannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad J.K., 2015, Carburizing of steel, International Journal of Materials Science and Applications, 4 (2-1), 11-14.
- Baligheid R.G., Prasad S.K., 2007, Effect of Al and C on structure and mechanical properties of Fe-Al-C alloys, Materials Science and Technology, 23(1), 38-44.
- Baligheid R.G., Prasad S.K., Rao A., 2007, Effect of Ti, W, Mn, Mo, and Si on microstructure and mechanical properties of high carbon Fe-10,5wt% Al alloy, Journal of Material Science and Technology, 23(5), 613-619.
- Banerji S.K., 1982, The 1982 status report on Fe-Mn-Al steel, Foote Mineral Co, Exton.
- Campagnolo A., Dabala M., Meneghetti G., 2019, Effect of salt bath nitrocarburizing and post-oxidation on static and fatigue behaviour of a construction steel, Metals 2019, 9, 1306.
- Darmo S., Soenoko R., Siswanto E., Widodo D.T., 2018, Study on mechanical properties of pack carburizing SS400 steel with energizer pomacea canalikulata lamarck shell powder, Internasional Journal Of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), 9(5), 14-23.
- Fontana G.M., 1988, Corrosion engineering, 3th ed., McGraw Hill Inc., Singapore.
- Frommeyer G., 2000, Physical and mechanical properties of Iron-Aluminum-(Mn-Si) lightweight steels, The 1999 ATS International Steelmaking Conference, Paris. Sec.4.

- Giza K., Bala H., Wysocki J.J., Szymura S., 1999, Corrosion resistance of Fe-Al-C permanent magnet alloy, *Intermetallic*, 6(5),357-362.
- Jablonska M., Jasik A., Hanc A., 2009, Structures and phases transitions of the alloys on the bases of Fe-Al intermetallic phases, *International Scientific Journal*, 29(1), 16-19.
- Kobayashi S., Zaefferer S., Schneider A., Raabe D., Frommeyer G., 2005, Optimisation of precipitation for controlling recrystallization of wrought Fe3Al based alloys, *Intermetallics*, 13, 1296-1303.
- Peng J., Moszner F., Rechmann J., Vogel D., Palm M., Rohwerder M., 2019, Influence of Al content and pre-oxidation on the aqueous corrosion resistance of binary Fe-Al alloys in sulphuric acid, *Corrosion Science*, 149, 123-132.
- Rahnama A., Kotadia H., Clark S., Janik V., Sridar S., 2018, Nano-mechanical properties of Fe-Mn-Al-C lightweight steel, *Scientific Reports*, 8, 9065.
- Kartikasari R., 2014, Effect of aluminum content on microstructure and corrosion behavior of as cast Fe-Al-C alloys lightweight steel, *International Journal of Applied Engineering Research*, 9 (13), 2241-2249.
- Kartikasari R., 2015, Effect of mangan content on mechanical properties and corrosion behavior of as cast Fe-7.5Al-0.6C alloy, *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(13), 32884-32887.
- Seol J.B., 2018, A Brief review of κ -carbide in Fe-Mn-Al-C model alloy, *Applied Microscopy*, 48(4);116-121.
- Rao S.V., 2004, High temperature oxidation behavior of Fe-Al-C alloys: an overview, *Materials Science and Engineering. A*, 364(1-2), 232-239.
- Smith W.F., 2002, *Structure and properties of engineering alloys*, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc., New York.
- Sulaiman S.A., Alias S.K., Ahmad S., Fauzi M.H., Ahmad N.N., 2016, Study on the effect of corrosion behaviour of stainless steel before and after carburizing heat treatment, *Material Science and Engineering*, 160, 012027.
- Supriyono, 2018, The Effect of pack carburizing using charcoal on properties of mild steel, *Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 19(1), 38-44.