

Pengaruh Kadar Kromium (Cr) Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Paduan Fe-Cr-Mn Melalui Proses Peleburan

Ali Yafi, Hosta Ardhyanta, dan Sutarsis
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

Abstrak— Baja Paduan Fe-Cr-Mn merupakan salah satu tipe *austenitic stainless steel*. Paduan ini menghasilkan kekuatan dan kekerasan lebih tinggi daripada baja karbon rendah. Kromium adalah salah satu unsur yang mampu meningkatkan kekerasan baja karbon. Namun, kelarutan Cr dalam fasa Austenit terbatas. Proses pemaduan yang dilakukan pada penelitian ini adalah proses peleburan. Proses yang dilakukan adalah meleburkan raw material menggunakan Electric Arc Furnace pada Temperatur 1800°C selama 2 menit. Pada penelitian ini dilakukan variasi kadar Kromium yaitu pada kadar 14, 16, 18, dan 20% Cr pada Baja paduan Fe-Cr-Mn untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekerasan dan strukturmikro paduan. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi kimia menggunakan OES, Uji fasa menggunakan XRD, Uji Struktur Mikro, dan uji kekerasan menggunakan metode Brinell. Struktur Mikro hasil coran menunjukkan fasa Austenit dan Ferrit pada Baja paduan Fe-20Cr-Mn dan terbentuknya Karbida karena kadar Karbon dalam paduan lebih dari 0.2%. Kekerasan pada Baja Paduan Fe-Cr-Mn juga meningkat seiring bertambahnya kadar Kromium, hal ini terjadi akibat *solid solution strengthening*.

Kata Kunci - Fe-Cr-Mn, Kromium, Kekerasan, Struktur Mikro

I. PENDAHULUAN

Sifat-sifat khas bahan industri perlu dikenal secara baik karena bahan tersebut dipergunakan untuk berbagai macam keperluan dalam berbagai keadaan. Sifat-sifat suatu bahan sangat banyak, seperti sifat mekanik, sifat fisik, sifat kimia, dan masih banyak lainnya. Kebanyakan sifat-sifat tersebut ditentukan oleh unsur dan komposisinya [1].

Bahan logam dapat dikelompokkan dalam dua kelompok yaitu logam besi (*ferrous*) dan logam bukan besi (*non ferrous*). Logam *ferrous* yaitu suatu logam paduan yang terdiri bahan dasar besi (Fe) dengan karbon (C). Sedangkan logam *non ferrous* adalah suatu logam paduan yang tidak menggunakan besi (Fe) sebagai bahan utama, seperti Aluminium (Al), Tembaga (Cu), Perak (Ag), Seng (Zn), Nickel (Ni) dsb. Produksi logam *ferrous* lebih besar daripada tipe logam yang lain. Penggunaannya sangat penting pada

material konstruksi dan juga relatif ekonomis cara pembuatannya [2].

Baja adalah paduan besi-karbon yang mengandung unsur paduan yang lain dengan konsentrasi Fe yang cukup besar. Berdasarkan kadar karbonnya baja diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu baja karbon rendah, menengah, dan tinggi. Semakin banyak kadar karbonnya maka sifat baja akan semakin kuat dan keras namun keuletan menurun. [2]. Unsur paduan sangat mempengaruhi sifat dari suatu baja [3].

Baja karbon rendah merupakan baja dengan kadar karbon kurang dari 0.25% C. Baja ini memiliki kekuatan tarik 365 MPa dan kekerasan 95 HB [4]. Dengan sifat mekanik yang relatif rendah, perlu adanya unsur paduan untuk meningkatkan sifat mekanik baja karbon rendah. Salah satu unsur yang bisa dijadikan pilihan dalam pemaduan baja karbon rendah adalah kromium. Kromium adalah salah satu unsur yang mampu meningkatkan kekerasan baja karbon [4]. Selain mampu meningkatkan kekerasan baja, kromium juga dapat meningkatkan ketahanan korosi. Baja Paduan Fe-Cr-Mn adalah paduan yang memiliki kekuatan dan kekerasan lebih tinggi daripada baja karbon rendah. Presentase Kromium sebesar 16-18% pada baja AISI 201 mampu menghasilkan kekuatan tarik sebesar 655 MPa dan kekerasan sebesar 241 HB. Baja Paduan Fe-Cr-Mn merupakan salah satu tipe *stainless steel* [5].

Stainless steel adalah paduan berbasis besi dengan kadar kromium tidak kurang dari 10.5% Cr. Ada beberapa tipe *stainless steel*, seperti *austenitic stainless steel*, *ferritic stainless steel*, *martensitic stainless steel* dll. Paduan Fe-Cr-Mn adalah salah satu paduan *stainless steel* yang termasuk dalam seri *austenitic stainless steel*. Paduan ini dikatakan *austenitic stainless steel* karena memiliki fasa austenit pada temperatur kamar. Keberadaan unsur mangan menjadi faktor utama penstabil austenit. Kelebihan seri *austenitic stainless steel* yaitu memiliki kekuatan yang tinggi pada temperatur yang tinggi [6].

II. METODOLOGI

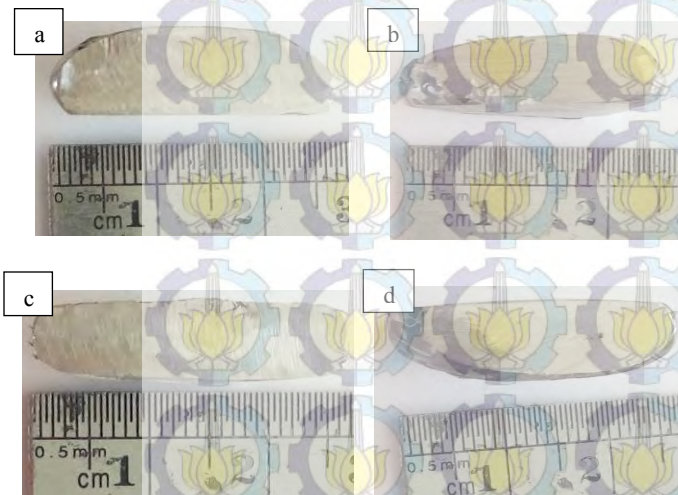
Sebelum melakukan eksperimen, preparasi sampel dilakukan dengan cara menghitung massa tiap – tiap bahan lebur untuk mendapatkan komposisi hasil yang diinginkan. Bahan yang akan dilebur terdiri dari Baja AISI 1006,

Ferrochrome low Carbon, Ferromangan Medium Carbon, dan Nikel. Perhitungan massa bahan lebur pada penelitian kali ini menggunakan prinsip *material balance*. Setelah proses penghitungan jumlah bahan lebur, Kemudian raw material diletakkan pada krusibel yang terbuat dari Batu tahan api. Langkah selanjutnya yaitu melakukan peleburan bahan lebur yang telah diletakkan dalam krusibel menggunakan Electric Arc Furnace dengan elektroda Grafit pada temperatur 1800°C selama 2 menit. Baja paduan yang telah selesai dilebur dibiarkan hingga membeku. Setelah membeku seluruhnya hasil peleburan diambil dengan menghancurkan krusibel. Metode pembuatan specimen uji dilakukan dengan memotong benda hasil peleburan menggunakan gergaji sesuai bentuk yang diinginkan. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah Uji Komposisi menggunakan Optical Emission Spectroscopy (OES), Uji Struktur Mikro, Uji Kekerasan dengan Metode Brinell, Uji Fasa dengan X-Ray Diffraction (XRD).

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Pengamatan Makro Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Baja paduan Fe-Cr-Mn yang telah dipotong secara melintang dapat dilihat pada Gambar 1. Dimensi dari keempat paduan menyesuaikan dimensi dari krusibel. Secara fisik keempat paduan memiliki kemiripan warna, yaitu warna Silver. Dengan penambahan Kromium, tidak terjadi perbedaan warna dari keempat paduan. Hasil pengecoran keempat paduan juga tidak memperlihatkan adanya porositas. Segregasi juga tidak tampak pada hasil coran, memperlihatkan *Raw Material* yang dilebur telah tercampur sempurna.



Gambar 1 Baja Paduan Fe-Cr-Mn (a) 14 (b) 16 (c) 18 (d) 20 %wt Cr

B. Komposisi Kimia Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Tabel 1 menunjukkan Komposisi Kimia Baja Paduan Fe-Cr-Mn hasil pengujian Optical Emission Spectroscopy.

Tabel 1 Komposisi kimia Baja Paduan Fe-Cr-Mn hasil

Paduan	Pengujian OES (%)					
	Fe	Cr	Mn	Ni	C	others
Fe-14Cr-Mn	73.9	13.9	5.12	5.87	0.239	<1
Fe-16Cr-Mn	72.4	16.9	3.06	5.93	0.306	<1.4
Fe-18Cr-Mn	67.9	19.6	4.30	6.49	0.429	<1.3
Fe-20Cr-Mn	65.8	21.5	4.07	5.79	0.29	<2.5

Namun, berdasarkan hasil yang telah didapatkan melalui pengujian komposisi kimia menggunakan Optical Emission Spectroscopy yang dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) dan PT. Barata Indonesia (Persero), terdapat perbedaan presentase unsur yang dimasukkan sebelum proses peleburan dengan hasil peleburan.

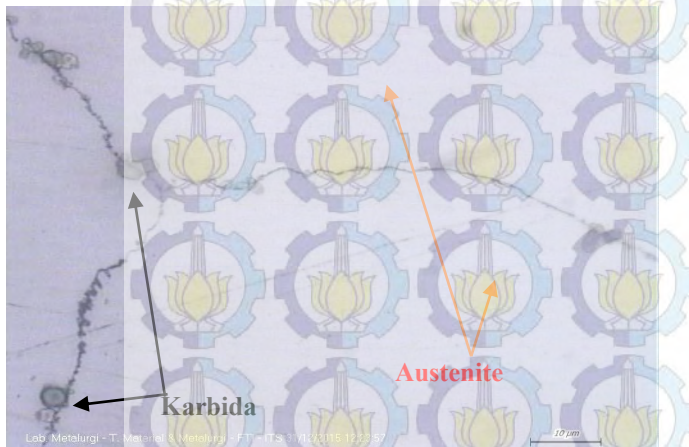
Unsur Cr yang menjadi *alloying* utama pada penelitian ini tidak mengalami perubahan yang cukup banyak, perubahan terbesar terjadi pada paduan Fe-18Cr-Mn yaitu sebesar 1.6%, begitu pula yang terjadi dengan unsur Ni yang tidak mengalami perubahan cukup banyak. Perubahan yang cukup besar terjadi pada unsur Mn dimana pada keempat paduan hasil pengecoran, unsur ini berkurang antara 2.5-4.5%. Turunnya kadar Mangan ini disebabkan oleh reaksi oksidasi Mn menjadi oksida mangan (MnO) pada proses pengecoran [7].

C. Pengamatan Struktur Mikro Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Pengujian Metalografi dilakukan sesuai standar ASTM E407 dan dilakukan di Laboratorium Metalurgi menggunakan Olympus BX. Larutan etsa yang digunakan adalah gliseresia. Gliseresia dibuat sesuai standar dengan 6mL gliserol ditambah 4mL asam nitrat serta ditambahkan 6mL HCl. Etsa dilakukan dengan mencelupkan Paduan pada air dengan temperatur 100°C untuk mereaksikan logam dengan larutan etsa kemudian dietsa ±20 detik pada gliseresia.

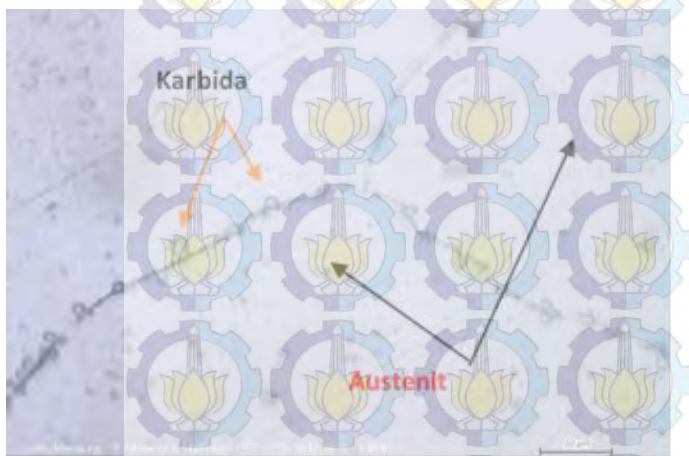
Hasil pengujian Struktur Mikro Paduan Fe-14Cr-Mn dapat dilihat pada Gambar 2. Struktur Mikro paduan ini terdiri dari Fasa Austenit dan Karbida. Fasa Austenit ini terbentuk karena keberadaan unsur Ni dan Mn yang merupakan penstabil Austenit, sehingga dapat membentuk fasa Austenit pada temperatur kamar. Pada Paduan ini tidak tampak adanya fasa selain Austenit, hal ini disebabkan oleh larutnya Kromium pada fasa Austenit. Karbida dapat terbentuk apabila kadar Karbon dalam paduan mencukupi [3]. Karbida yang terbentuk ini terlihat berada pada batas butir. Presipitasi karbida terjadi pada batas butir terjadi karena pada batas butir memiliki orientasi yang berbeda-beda [14]. Batas butir adalah tempat dimana terdapat ketidak-teraturan susunan atom, sehingga merupakan tempat yang tegang. Disamping itu biasanya batas butir mengandung impurity lebih banyak. Hal serupa juga disebutkan oleh Rahimi, R. dkk [8] dalam penelitiannya, yang menyebutkan bahwa dalam paduan Fe-Cr-Ni-Mn-C juga terdapat fasa Austenit dengan karbida yang tersebar pada Fasa Austenit. Berdasarkan penelitian Sudhakaran R. dkk [9] Pada Baja AISI 202 yang

juga merupakan salah satu paduan Fe-Cr-Mn juga memiliki fasa Austenit dengan karbida yang tersebar pada fasa Austenit.



Gambar 2 Struktur Mikro Paduan Fe-14Cr-Mn perbesaran 1000x

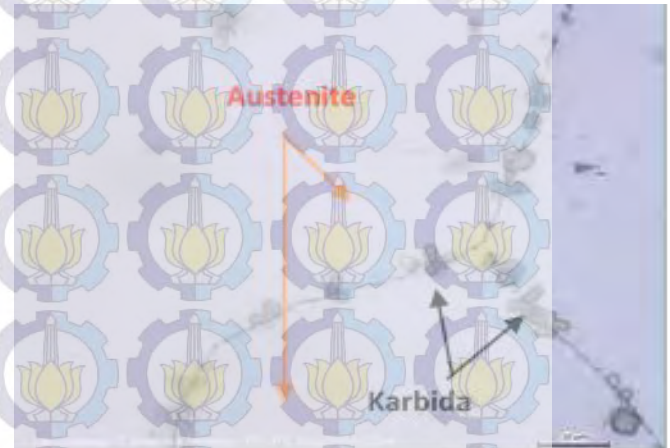
Pada paduan Fe-16Cr-Mn juga memperlihatkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan paduan Fe-14Cr-Mn, yaitu memperlihatkan Fasa Austenit dan Karbida seperti terlihat pada Gambar 3. Karbida yang terbentuk tidak hanya berada pada batas butir namun juga tersebar pada matriks Austenit. Jika dibandingkan dengan Paduan Fe-14Cr-Mn, terlihat Karbida yang terbentuk pada Paduan Fe-16Cr-Mn lebih banyak, hal ini dikarenakan kadar Karbon pada Paduan ini lebih tinggi dari Paduan Fe-14Cr-Mn. Kadar Karbon Paduan ini sebesar 0.3%. Hal serupa juga ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Zheng, dkk. [15] Menurut Zheng, Karbida akan terbentuk semakin banyak apabila kadar Karbon meningkat.



Gambar 3 Struktur Mikro Paduan Fe-16Cr-Mn dengan perbesaran 1000x

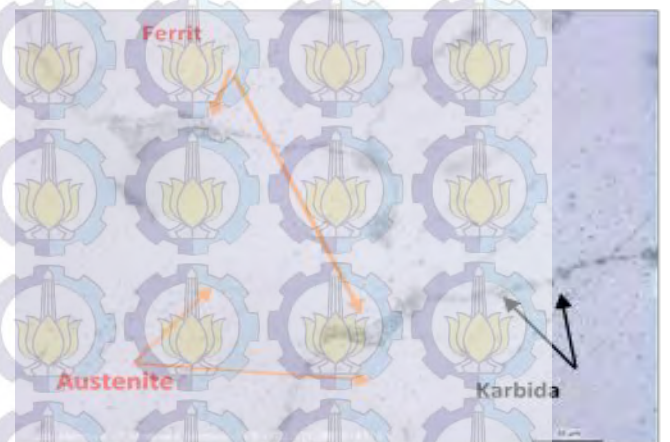
Menurut Rawers [16] Karbon memiliki batas kelarutan dalam Stainless Steel, hal ini menyebabkan terbentuknya Karbida. Kecenderungan yang terjadi adalah Kromium berikatan dengan Karbon. Oleh karena itu, Karbon jarang ditambahkan pada Stainless Steel.

Komposisi Kimia pada Paduan Fe-18Cr-Mn menunjukkan bertambahnya kadar Karbon dibandingkan paduan sebelumnya. Sudah dijelaskan pada Paduan Fe-16Cr-Mn bahwa dengan kenaikan kadar Karbon akan mengakibatkan bertambahnya jumlah Karbida. Hal ini juga terlihat pada Gambar 4 yang menunjukkan Struktur Mikro Paduan Fe-18Cr-Mn. Pada batas butir terlihat semakin banyak jumlah Karbida yang terbentuk.



Gambar 4 Struktur Mikro Paduan Fe-18Cr-Mn dengan perbesaran 1000x

Pada Paduan Fe-20Cr-Mn dengan kadar Kromium sebesar 21.5% menunjukkan terbentuknya fasa baru, yaitu ferrit ditunjukkan pada Gambar 5. Ferrit yang terbentuk ini akibat semakin banyaknya kadar Kromium dalam Baja Paduan Fe-Cr-Mn. Pada penelitian yang dilakukan oleh Chen, dkk. [17] mengenai paduan baja Fe-Cr-Mn-C, fasa Ferrite dengan struktur BCC terlihat ketika kadar Kromium dalam paduan mencapai 20%. Hal ini terjadi pada Baja tahan karat Austenitik, hal ini mengindikasikan bahwa Cr adalah pembentuk ferrite yang kuat.



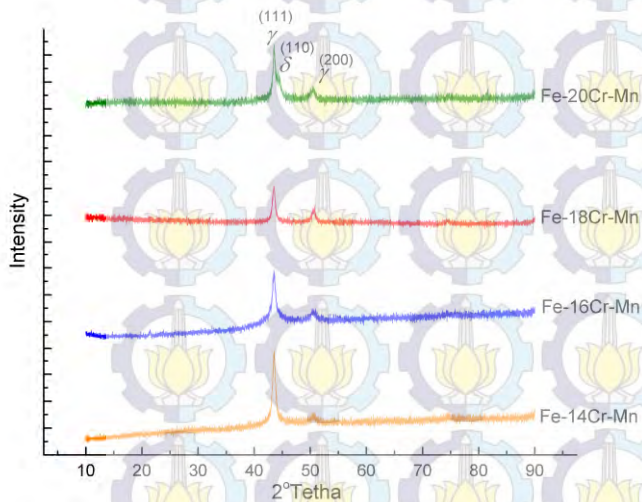
Gambar 5 Struktur Mikro Paduan Fe-20Cr-Mn dengan perbesaran 1000x

Baldissin, D. dkk. [10], meneliti mengenai pengecoran Fe-Cr-Mn dengan presentase 18–20%Cr, 4–6%Ni, 0.04–0.06%C, 0.3–0.5%Si, 6–8%Mn, 1–2%Cu, 0.11%Mo, 0.2–0.4%N. Struktur Mikro hasil pengecoran

yang dia lakukan menunjukkan adanya fasa Austenit dan Ferrit. Fasa Austenit berwarna terang sedangkan Fasa Ferrit berbentuk *network*.

D. Pengamatan Pola XRD Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material menggunakan PANalytical X'Pert Pro. Pola XRD dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Pola XRD Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Analisa hasil pengujian XRD menggunakan software *PCPDFWIN*. Hasil analisa pola XRD terlihat bahwa keempat paduan memiliki puncak untuk fasa Austenit. Pada Paduan Fe-14Cr-Mn puncak pertama pada peak 43.48 dan puncak kedua pada peak 50.56. Pada Paduan Fe-16Cr-Mn puncak pertama pada peak 43.52 dan puncak kedua pada peak 50.39. Pada Paduan Fe-18Cr-Mn puncak pertama pada peak 43.49 sedangkan puncak kedua pada peak 50.73. Pada Paduan Fe-20Cr-Mn terlihat adanya tiga puncak, hal ini berbeda dengan ketiga Paduan sebelumnya yang hanya memperlihatkan adanya dua puncak. Puncak pertama menunjukkan fasa Austenit pada peak 43.53, puncak kedua menunjukkan fasa Ferrit pada peak 44.56, sedangkan puncak ketiga menunjukkan fasa Austenit pada peak 50.54.

Keempat Paduan tidak memperlihatkan adanya peak yang menunjukkan adanya Karbida, hal ini juga terjadi pada penelitian Rahimi, R. dkk [11] Menurut Baghbadorani, H.S. dkk [12] yang melakukan penelitian pada Baja AISI 201 hal ini dikarenakan terbatasnya kemampuan XRD untuk membaca fasa dalam jumlah yang sedikit.

Untuk membantu identifikasi karbida dalam paduan dilakukan uji EDX. Pengujian EDX ini dilakukan dengan menembak titik yang disinyalir sebagai karbida. Dari hasil pengujian EDX diketahui bahwa titik yang ditembak mengandung unsur Fe, Cr, dan C. dengan keberadaan unsur C pada titik tersebut maka dapat diketahui Karbida terbentuk.

E. Pengujian Kekerasan Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Pengujian kekerasan coran paduan dilakukan dengan menggunakan metode uji kekerasan brinell dengan standar

ASTM E10. Menggunakan bola baja dengan diameter 2,5 mm dan beban 187.5 kgf.

Tabel 2 menunjukkan perbedaan nilai kekerasan terhadap kadar Kromium pada Baja Paduan Fe-Cr-Mn. Pengujian dilakukan pada 3 indentasi untuk setiap 1 spesimen sehingga didapat 3 nilai kekerasan brinell lalu dirata-rata.

Tabel 2 Nilai Kekerasan Baja Paduan Fe-Cr-Mn

Paduan	Kekerasan, HB
Fe-14Cr-Mn	219.67 ± 3.858
Fe-16Cr-Mn	227.67 ± 2.494
Fe-18Cr-Mn	243.67 ± 3.858
Fe-20Cr-Mn	255 ± 4.32

Dari hasil pengujian yang dilakukan dapat diketahui bahwa dengan penambahan Kromium yang terjadi, Nilai Kekerasan juga meningkat. Meningkatnya nilai kekerasan ini diakibatkan larutnya Kromium dalam fasa Austenit. Dalam fasa Austenit unsur yang berpotensi dapat meningkatkan kekerasan Paduan adalah penstabil ferrit. Sedangkan Penstabil austenit tidak terlalu banyak meningkatkan kekerasan fasa Austenit itu sendiri. Justru dengan keberadaan Nikel dapat menurunkan kekerasan fasa Austenit [18].

Larutan padat Interstisi maupun substitusi mempunyai struktur Kristal yang terdistorsi, terutama di sekitar tempat solute atom. Distorsi ini akan menimbulkan tegangan disekitarnya dan menghambat gerakan dislokasi pada bidang slip, sehingga untuk menghasilkan slip diperlukan gaya yang lebih besar. Karena itu adanya solute atom akan menaikkan kekuatan dan kekerasan suatu larutan padat, makin banyak solute atom yang terlarut makin tinggi kenaikan kekuatan/kekerasan yang terjadi. Hal ini merupakan salah satu dasar penguatan logam dengan pemaduan [3].

Stepanov, dkk [19] melakukan penelitian terhadap pengaruh Kromium terhadap Paduan Fe-Cr-Mn. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, penambahan Kromium dapat meningkatkan Kekerasan Paduan Fe-Cr-Mn. Kenaikan kekerasan yang terjadi pada Paduan Fe-Cr-Mn disebabkan oleh larutnya Kromium dalam fasa Austenit

Nilai kekerasan tertinggi terjadi pada paduan Fe-Paduan Fe-20Cr-Mn yang memiliki fasa Austenit dan Ferrit. Naiknya kekerasan ini karena ferrit terdistribusi pada matriks Austenit. Ferrit lebih keras daripada Austenit karena banyak atom Cr yang masuk sebagai larutan padat. Secara umum, Ferrite lebih sulit mengalami dislokasi dibandingkan Austenit. Hal ini membuat deformasi antara ferrite dan Austenit tidak terarah. [13].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Guo, dkk [20] mengenai identifikasi fasa Ferrit dan Austenit pada Duplex Stainless Steel menyebutkan bahwa kekerasan Ferrit sebesar 4.41 ± 0.44 GPa sedangkan Austenit 3.57 ± 0.52 GPa. Hal ini juga telah dilaporkan oleh beberapa penelitian sebelumnya bahwa Ferrite lebih keras dibandingkan Austenit.

Penguatan Presipitasi dan penguatan secara disperse juga merupakan mekanisme dalam penguatan. Partikel-partikel semacam karbida, nitride dan senyawa intermetalik lainnya yang terdispersi pada matriks Asutenit

maupun pada batas butir dapat meningkatkan kekuatan paduan. Partikel tersebut menghalangi pergerakan dislokasi sehingga akan meningkatkan kekerasan baja. Penguatan dengan mekanisme ini tergantung pada ukuran partikel [21].

Memang susah menentukan mana yang memberikan efek penguatan yang lebih besar. Untuk menentukan kekerasan karbida, dapat dilihat strukturnya. Kehalusan partikel, bentuk, dan volume karbida yang terdispersi juga menentukan kekerasan karbida [4]

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah :

1. Pengaruh Kadar Kromium dapat meningkatkan Kekerasan Baja Paduan Fe-Cr-Mn. Nilai Kekerasan yang tertinggi terdapat pada Paduan Fe-20Cr-Mn yang memiliki kadar 21.5%Cr dengan nilai kekerasan 255 HB. Naiknya nilai kekerasan ini disebabkan oleh *solid solution strengthening*.
2. Pada Struktur Mikro Baja Paduan Fe-Cr-Mn, pengaruh kadar Kromium adalah terbentuknya fasa Ferrit pada Paduan Fe-20Cr-Mn, hal ini disebabkan karena Kromium adalah Penstabil Ferrit. Namun pada ketiga Paduan yang lain hanya terbentuk fasa Austenit karena Kromium larut dalam fasa Austenit. Karbida yang terbentuk pada Baja Paduan Fe-Cr-Mn disebabkan oleh kadar karbon diatas 0.2%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Surdia, T. (1999). Pengetahuan Bahan Teknik. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [2] Callister, W. D. (2009). Materials Science and Engineering An Introduction 8th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Avner, S. H. (1974). Introduction to Physical Metallurgy. New York: McGraw-Hill International Book Company
- [4] Bain, C. E. (1966). Alloying elements in steel. New York: American Society for Metals.
- [5] 2004. ASTM International. Standard Specification for Chromium-Nickel Stainless Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and General Applications.
- [6] 2005. ASM Metal Handbook, Vol 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. The Materials Information Company
- [7] Seetharman, S. (2014). Treatise on Process Metallurgy Industrial Processes, Part A. Oxford: Elsevier.
- [8] Rahimi, R., De Cooman, B.C., Biermann, H., Mola, J. (2014). Microstructure and mechanical properties of Al-alloyed Fe-Cr-Ni-Mn-C stainless steels. Materials Science & Engineering A 618: 46-55
- [9] Sudhakaran, R., Sivasakthivel, P.S., Nagaraja, S., Eazhil, K.M. (2014). The Effect of Welding Process Parameters on Pitting Corrosion and Microstructure of Chromium-Manganese Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welded Plates. Procedia Engineering 97: 790-799
- [10] Baldissin, D., Battezzati, L (2006). Multicomponent phase selection theory applied to high nitrogen and high manganese stainless steels. Scripta Materialia 55: 839-842
- [11] Rahimi, R., Ullrich, C., Klemm, V., Rafaja, D., De Cooman, B.C., Biermann, H., Mola, J. (2015). Influence of Al on temperature dependence of strain hardening behaviour and glide planarity in Fe-Cr-Ni-Mn-C austenitic stainless steels. Materials Science & Engineering. A 649: 301-312.
- [12] Baghbadorani, H.S. Kermanpur, A., Najafizadeh, A. Behjati, P., Rezaee, A., Moallemi, M. (2015). An Investigation on microstructure and mechanical properties of Nb-microalloyed nano/ultrafine grained 201 austenitic stainless steel. Materials Science & Engineering. A636: 593-599
- [13] Wang, Y.Q., Han, J., Yang, B., Wang, X.T. (2013). Strengthening of σ Phase in a Fe20Cr9Ni Cast Austenite Stainless Steel. Materials Characterization. 84: 120-125.
- [14] Lee, T., Lee, Y., Joo, S., Nersisyan, H., Park, K., Lee, J. (2015). Intergranular $M_{23}C_6$ Carbide Precipitation Behaviour and Its Effect on Mechanical Properties of Inconel 690 Tubes. Metallurgical And Materials Transactions A. Volume 46A. 4020-4026
- [15] Zheng, L., Hu, X., Kang, X., Li, D. (2015). Precipitation of $M_{23}C_6$ and Its Effect on Tensile Properties of 0.3C-20Cr-11Mn-1Mo-0.35N Steel. Materials and Design 78: 42-50
- [16] Rawers, J. C. (2008). Alloying effects on the Microstructure and Phase Stability of Fe-Cr-Mn Steels. J Mater Sci 43: 3618-3624
- [17] Chen, S. R., Davies, H. A., Rainforth, W. M. (1999). Austenite Phase Formation in Rapidly Solidified Fe-Cr-Mn-C Steels. Acta Mater. Vol. 47: 4555-4569
- [18] Durand, M., (2003). Microstructure of Steels and Cast Irons. Springer: Paris.
- [19] Stepanov, N.D., Shaysultaov, D.G., Tikhonovsky, M.A., Salishchev, G.A. (2015). Tensile Properties of the Cr-Fe-Ni-Mn non-equiatomic multicomponent alloys with different Cr contents. Materials and Design 87: 60-65
- [20] Guo, L.Q., Lin, M.C., Qiao, L.J., Volinsky, A.A. (2013). Ferrite and Austenite Phase Identification in Duplex Stainless Steel using SPM Technique. Applied Surface Science 287: 499-501
- [21] Shirzadi, A., Jackson, S. (2014). Structural Alloys for Power Plants: Operational Challenges and High-Temperatur Materials. Cambridge: Elsevier.