

Pengaruh Waktu Proses Deep Cryogenic Treatment Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, dan Keausan Paduan Fe-Al-Mn-Mo

Angelio Fila Delfianto Maitano¹, Ratna Kartikasari², Rivan Muhfidin³

^{1, 2, 3} Program Studi Teknik Mesin S1, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi : ratna@itny.ac.id, angeliomaitano@gmail.com

ABSTRAK

Paduan Fe-Al-Mn-Mo merupakan baja paduan yang termasuk baja tahan karat yang dikandidatkan menggantikan baja tahan karat konvensional paduan Fe-Cr-Ni. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap struktur mikro, kekerasan, dan keausan pada paduan Fe-Al-Mn-Mo. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah coran baja paduan Fe-Al-Mn-Mo. Uji komposisi dilakukan untuk mengetahui kandungan yang terdapat pada bahan uji, selanjutnya dilakukan persiapan spesimen dengan cara memotong bahan menjadi spesimen. Proses yang dilakukan adalah DCT dengan cara perendaman dalam nitrogen cair pada suhu -196°C dengan variasi waktu 1, 2, 3, 4, dan 5 jam. Kemudian dilakukan pengembalian pada suhu ruangan. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan dan pengujian keausan. Pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki unsur utama yakni Fe sebesar 76,52%, unsur paduan utama Mn sebesar 14,11%, Al sebesar 10,62% dan Mo sebesar 0,45% dan paduan Fe-Al-Mn-Mo termasuk baja paduan tinggi. Pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki struktur ferit dan austenite. Proses DCT menyebabkan struktur ferit semakin besar dan banyak sedangkan struktur austenite semakin kecil dan berkurang namun butir austenit akan semakin menyebar di antara butir ferit. Pengujian Kekerasan menunjukkan kenaikan kekerasan yang tidak signifikan. Pengujian keausan menunjukkan penurunan laju keausan.

Kata kunci: Paduan Fe-Al-Mn-Mo, *Deep Cryogenic Treatment*, Pengujian Struktur Mikro, Pengujian Kekerasan, Pengujian Keausan.

ABSTRACT

Fe-Al-Mn-Mo alloy is an alloy steel that includes stainless steel that is a candidate for replacing conventional stainless steel with Fe-Cr-Ni alloys. This study aims to study the effect of Deep Cryogenic Treatment (DCT) processing time on the microstructure, hardness, and wear of Fe-Al-Mn-Mo alloys. The material used in this research is Fe-Al-Mn-Mo alloy steel castings. The composition test is carried out to determine the content contained in the test material, then specimen preparation is carried out by cutting the material into specimens. The process carried out is DCT by immersion in liquid nitrogen at a temperature of -196°C with time variations of 1, 2, 3, 4, and 5 hours. Then it is returned to room temperature. The tests carried out are microstructure testing, hardness testing, and testing. The chemical composition test shows that the Fe-Al-Mn-Mo alloy has the main elements, namely Fe by 76.52%, the main alloying elements Mn by 14.11%, Al by 10.62%, and Mo by 0.45% and Fe-Al-Mn-Mo alloys are high alloy steels. Microstructure testing shows that Fe-Al-Mn-Mo alloys have ferrite and austenite structures. The DCT process causes the ferrite structure to get bigger and bigger while the austenite structure gets smaller and smaller than the grains. The austenite will spread more and more between the ferrite grains. The hardness test shows an insignificant increase in hardness. Wear testing shows a decrease in wear rate.

Keywords : *Fe-Al-Mn-Mo Alloy, Deep Cryogenic Treatment, Microstructure Testing, Hardness Testing, Wear Testing.*

S

1. PENDAHULUAN

Baja tahan karat (*stainless steel*) adalah paduan berbahan dasar besi (Fe) dengan kandungan krom (Cr) minimal 10,5% [11]. Fe-Cr-C merupakan paduan baja tahan karat feritik dimana Cr berperan dalam ketahanan korosi serta berfungsi sebagai penstabil struktur ferit [7]. Paduan Fe-Al-C merupakan paduan baru untuk menggantikan baja tahan karat konvensional, dimana unsur Al berfungsi untuk menggantikan unsur (Cr) pada baja tahan karat konvensional [4]. Telah diteliti bahwa paduan yang paling menjanjikan untuk menggantikan peran paduan Fe-Cr-C adalah paduan Fe-Al-C, dimana unsur Al menggantikan unsur Cr [12-13].

Telah diketahui bahwa keberadaan unsur aluminium (Al) di dunia sangat melimpah, dan merupakan elemen terbesar ketiga di dunia dan relatif murah [11] serta cara pembuatannya lebih mudah [1]. Disamping cadangan Al yang berlimpah, Al merupakan unsur yang ringan sehingga menurunkan densitas. Paduan Fe-Mn-C juga merupakan kandidat pengganti logam ringan untuk kendaraan dengan menambahkan unsur Al atau Si sehingga dapat meningkatkan efisiensi kendaraan [5]. Paduan Fe-Al-C feritik memiliki sifat fisik, mekanik, teknis, tahan korosi, tahan oksidasi, dan biaya bahan dasar yang kecil [6]. Paduan baja ringan Fe-Al-C yang memiliki sampai 9% Al menunjukkan penurunan massa jenis hingga 10% lebih tinggi [1]. Namun paduan Fe-Al-C pada suhu kamar memperlihatkan indikasi getas dengan angka kekuatan yang kecil. Paduan Fe-Mn-Al-C telah dibuat untuk berbagai pemanfaatan, termasuk aplikasi kriogenik, ketahanan oksidasi suhu tinggi dan penghalang erosi. Contoh aplikasinya yaitu pada industri penerbangan dan kimia, dengan komposisi kimia khusus yang disarankan untuk setiap aplikasi [10]. *Cryogenic treatment* pada baja tahan karat dapat meningkatkan ketahanan aus, meningkatkan kekuatan tanpa mengurangi plastisitas, meningkatkan ketahanan korosi dan meningkatkan kekuatan luluh [8]. Baja austenitik tinggi Mn menunjukkan perpaduan yang sangat baik dalam kekuatan dan keuletan, sehingga mendapat banyak perhatian belakangan ini sebagai kelas baja otomotif canggih berkekuatan tinggi [2].

Pengaruh Mo pada struktur mikro dan kekerasan *stainless steel* martensit 13Cr menunjukkan bahwa ekspansi Mo ke *stainless steel* martensit 13Cr memperluas substansi tahap delta ferit dalam struktur mikro dan mengurangi kekerasan baja tersebut [9]. Dampak *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) dan *Shallow Cryogenic Treatment* (SCT) pada *Bearing* AISI 440C [3]. Perlakuan DCT menunjukan peningkatan kekerasan sebesar 7% dan untuk perlakuan SCT dapat meningkatkan kekerasan sebesar 4% jika dibandingkan dengan *Conventional Heat Treatment* (CHT). Ini karena DCT dan SCT memiliki tingkat konversi austenit yang tertahan menjadi martensit yang lebih tinggi daripada CHT. Energi tumbukan dari sampel datar, perlakuan *cryo*, dan perlakuan *cryo* tradisional sebanding dengan sedikit perbedaan dalam energi tumbukan dan jenis patah getas untuk semua sampel. Analisis struktur mikro menunjukkan bahwa sampel CHT mempertahankan lebih banyak austenit dan lebih sedikit martensit dari pada *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) dan *Shallow Cryogenic Treatment* (SCT). Pada sampel yang diberi perlakuan *cryo*, jumlah austenit yang tertahan lebih rendah dibandingkan dengan CHT. Perlakuan yang digunakan adalah proses *deep cryogenic treatment* dalam nitrogen cair (-196°C) dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam.

2. METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah coran paduan Fe-Al-Mn-Mo berbentuk ingot sebesar 19,5 x 5 x 1,5 cm, kemudian spesimen disiapkan dengan memotong ingot dalam menjadi 1 buah spesimen pengujian komposisi kimia, 6 buah spesimen pengujian struktur mikro, 6 buah spesimen pengujian kekerasan, 6 buah spesimen pengujian keausan. Masing-masing dari pengujian yang akan dilakukan membutuhkan 6 spesimen, yang dimana 5 dari 6 spesimen dari masing-masing pengujian akan dilakukan proses DCT dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Pengujian komposisi kimia menggunakan alat *spectrometer*. Pengujian struktur mikro menggunakan alat mikroskop optik. Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* menggunakan alat *Universal Hardness Test* dengan beban 40 kgf. Pengujian keausan dengan metode Ogoshi menggunakan alat *Ogoshi high universal wear testing machine* (Type OAT-U).

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Analisis Hasil Pengujian Komposisi Kimia

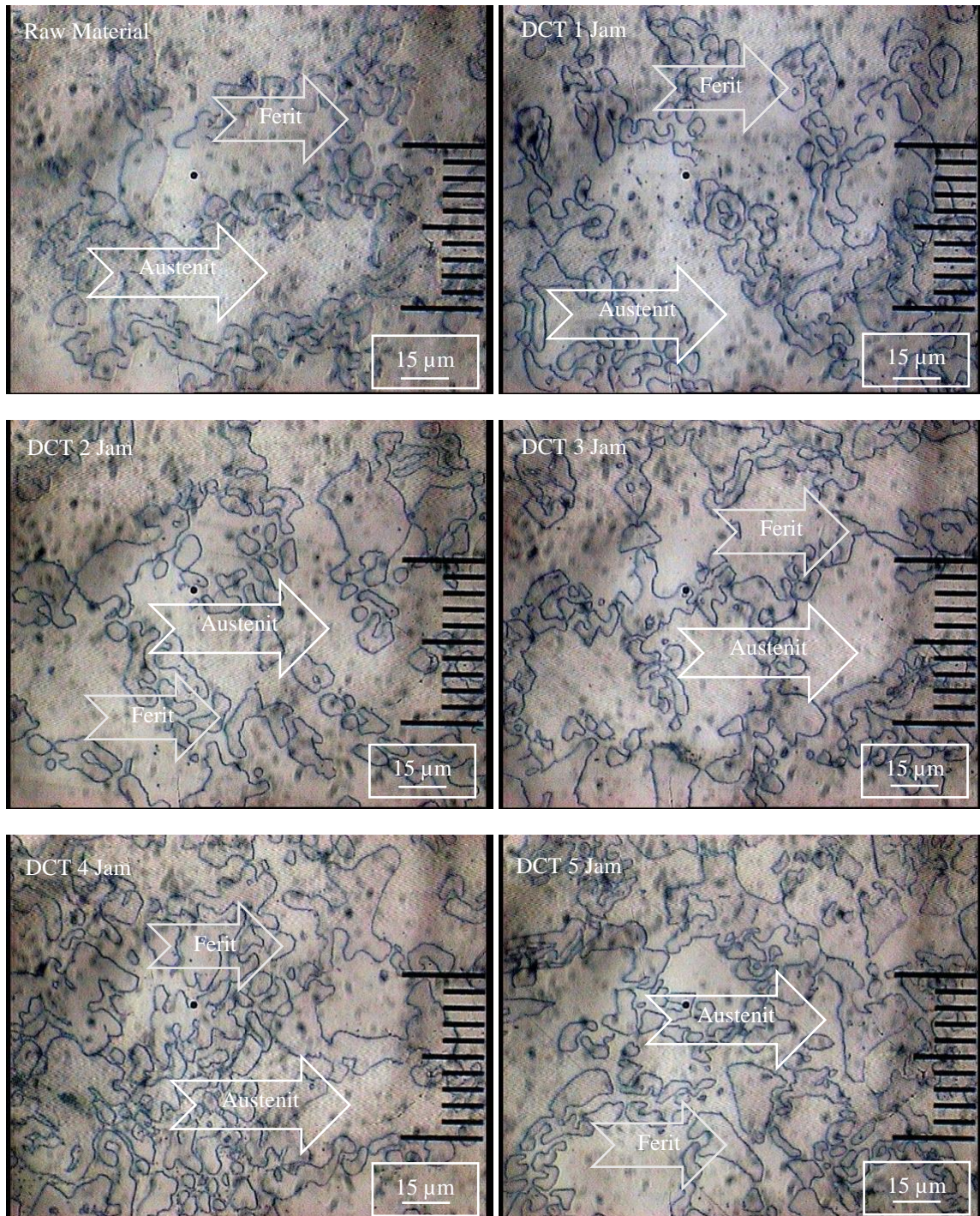
Hasil pengujian komposisi kimia (Tabel 1) menunjukkan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki unsur utama yakni Fe sebesar 76,52%, unsur paduan utama Al sebesar 10,62% Mn sebesar 14,11%, dan Mo sebesar 0,45%. Aluminium (Al) berfungsi untuk membentuk dan menstabilkan struktur ferit serta meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi. Mangan (Mn) berfungsi untuk membentuk dan menstabilkan struktur austenit serta meningkatkan kekuatan baja. Molibdenum (Mo) berfungsi untuk meningkatkan kekerasan, meningkatkan ketangguhan dan memperluas substansi tahap delta ferit.

Tabel 1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Fe-Al-Mn-Mo

Unsur	Fe	Mn	Al	Mo	C	Si	S	Mg	Sn	Cu	Ni	P	Ti	Nb	V	Co	Pb	Zn	Cr	Total
W (%Berat)	76, 52	14, 11	10, 62	0, 45	1, 28	2, 47	0, 04	0, 03	0, 02	0, 13	0, 06	0, 07	0, 02	0, 01	0, 09	0, 02	0, 07	0, 21	0, 09	100

3.2. Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan menggunakan alat mikroskop optik dengan pembesaran 200x pada 6 spesimen dimana 1 spesimen raw material, 5 spesimen perlakuan DCT pada temperatur (-196°C) dengan variasi waktu 1, 2, 3, 4, dan 5 jam.



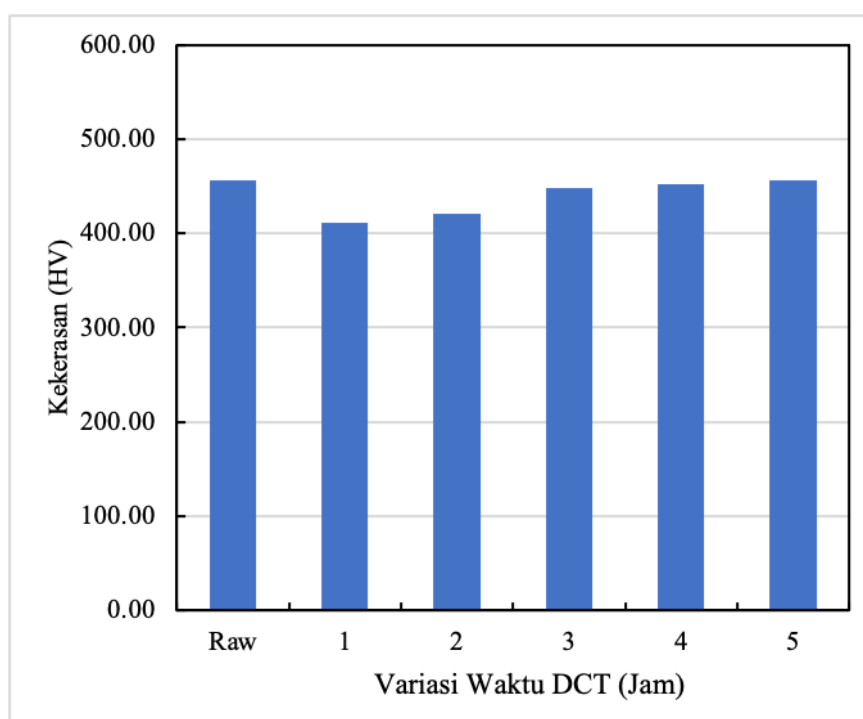
Gambar 1 Struktur Mikro Paduan Fe-Al-Mn-Mo Sebelum dan Sesudah Proses DCT

Hasil foto struktur mikro *raw material* menunjukkan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Mo, memiliki struktur ferit dan austenit dimana terlihat bahwa struktur austenit lebih besar dan dominan, struktur ferit lebih

kecil dan sedikit. Hal ini disebabkan karena Al berfungsi untuk menstabilkan struktur ferit dan Mn berfungsi untuk menstabilkan struktur austenit. Pada perendaman DCT 1 jam memperlihatkan bahwa struktur ferit lebih membesar dari struktur mikro pada *raw material* namun struktur austenit masih lebih dominan. Hal ini karena terjadi rekristalisasi pada austenit dan ferit serta pertumbuhan butir pada ferit.

Pada perendaman DCT 2 jam memperlihatkan bahwa struktur ferit semakin membesar dan banyak sedangkan struktur austenit ukurannya semakin mengecil dan jumlahnya semakin banyak. Dengan bertambahnya waktu proses DCT, proses rekristalisasi terjadi secara simultan pada ferit dan austenit disertai peningkatan pertumbuhan butir. Pada perendaman DCT 3 jam memperlihatkan bahwa struktur ferit semakin besar, struktur austenit semakin berkurang dengan besar butir yang mulai mengecil. Pada perendaman DCT 4 jam memperlihatkan bahwa ferit menjadi dominan disamping masih terus terjadi pertumbuhan butir, sedangkan struktur austenit semakin berkurang dan butir austenit masih mengecil. Pada perendaman DCT 5 jam pada memperlihatkan bahwa struktur ferit semakin dominan dan butirnya membesar, sedangkan struktur austenit ukurannya semakin kecil, jumlahnya semakin banyak dan tersebar merata.

3.3. Analisis Hasil Pengujian Kekerasan



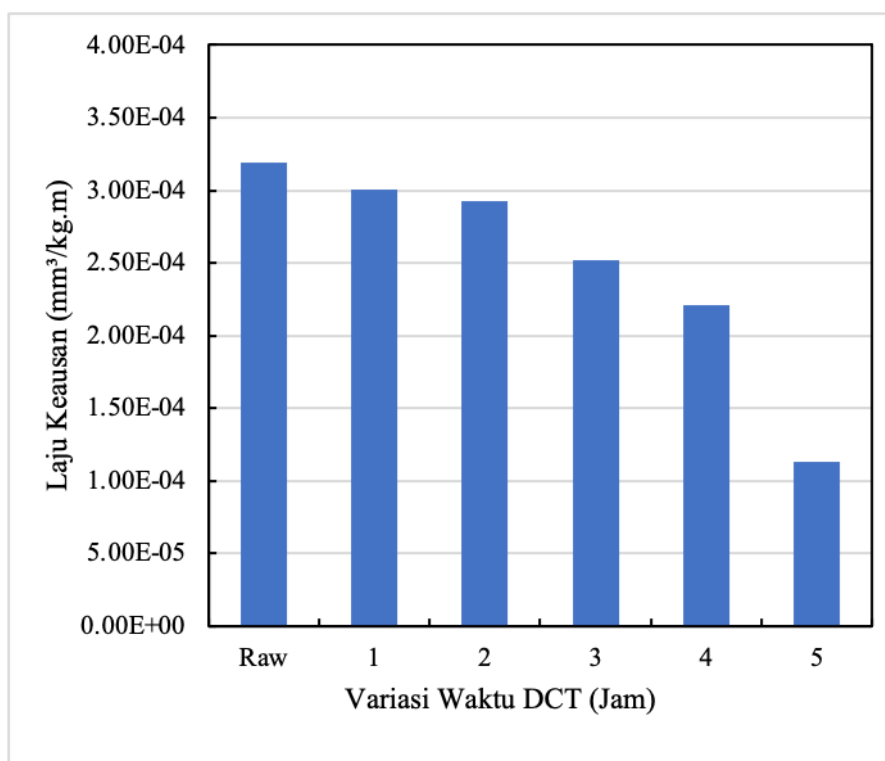
Gambar 2 Diagram rata-rata pengujian kekerasan *Vickers* paduan Fe-Al-Mn-Mo

Pengujian kekerasan *Vickers* dilakukan masing-masing tiga kali di titik yang berbeda secara acak untuk setiap specimen. Pada specimen *raw material* memiliki kekerasan sebesar $455,92 \text{ kg/mm}^2$. Namun pada proses DCT 1 jam hasil ini menurun menjadi $411,90 \text{ kg/mm}^2$, terjadi penurunan signifikan sebesar 9,65 % dibandingkan dengan *raw material*. Pada perendaman DCT 2 jam hasilnya meningkat dari $411,90 \text{ kg/mm}^2$ menjadi $420,53 \text{ kg/mm}^2$, terjadi peningkatan yang tidak signifikan sebesar 2,09 % dibandingkan proses DCT 2 jam. Pada perendaman DCT 3 jam nilai kekerasan meningkat dari $420,53 \text{ kg/mm}^2$ menjadi $448,47 \text{ kg/mm}^2$, terjadi kenaikan signifikan sebesar 6,64 % dibandingkan proses DCT 2 jam. Pada perendaman DCT 4 jam mengalami peningkatan sebesar 0,9 % dari $448,47 \text{ kg/mm}^2$ menjadi $452,68 \text{ kg/mm}^2$, peningkatan ini tidak signifikan dibandingkan proses DCT 3 jam.

Pada perendaman DCT 5 jam terjadi peningkatan tidak signifikan sebesar 0,77 % dari $452,68 \text{ kg/mm}^2$ menjadi $456,20 \text{ kg/mm}^2$ dibandingkan proses DCT 4 jam. Pengujian kekerasan *Vickers* paduan Fe-Al-Mn-Mo menunjukkan hasil tertinggi pada specimen dengan perendaman DCT 5 jam sebesar $456,20 \text{ kg/mm}^2$, saat proses DCT 1 jam kekerasannya turun signifikan sebesar 9,65 % menjadi $411,90 \text{ kg/mm}^2$. Setelah proses DCT 1 jam, angka kekerasannya terus meningkat sehingga mencapai kekerasan tertinggi pada

proses DCT 5 jam sebesar $456,20 \text{ kg/mm}^2$. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan austenit menjadi ferit. Namun rata-rata peningkatannya tidak signifikan.

3.4. Analisis Hasil Pengujian Keausan



Gambar 3 Diagram rata-rata pengujian keausan paduan Fe-Al-Mn-Mo

Gambar 3 menunjukkan hasil pengujian keausan dengan menggunakan *Universal Wear* dengan gaya tekan 6,36 kg dengan jarak pengausan 15 m, setiap spesimen dilakukan pengujian pada 3 gesekan yang berbeda berdasarkan hasil pengujian keausan pada spesimen *raw material* menunjukkan laju keausan sebesar $0,00032 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$. Proses DCT 1 jam menunjukkan laju keausan sebesar $0,00030 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan laju keausan sebesar 6,67 % dibanding dengan raw material, penurunan ini termasuk signifikan. Dalam proses DCT, terjadi pelepasan *internal stress* serta pengurangan cacat struktur mikro yang merupakan faktor penting dalam peningkatan ketahanan aus dan kekuatan bahan (Liu, 2020).

Proses DCT 2 jam menunjukkan laju keausan sebesar $0,00029 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan laju keausan tidak signifikan sebesar 3,44 % dibanding dengan proses DCT 1 jam. Proses DCT 3 jam menunjukkan laju keausan sebesar $0,00025 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan laju keausan signifikan sebesar 16 % dibanding dengan proses DCT 2 jam. Proses DCT 4 jam menunjukkan laju keausan sebesar $0,00024 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$, dapat dilihat bahwa terjadi masih mengalami penurunan laju keausan signifikan sebesar 13,63 % dibanding dengan proses DCT 3 jam. Proses DCT 5 jam menunjukkan laju keausan sebesar $0,00011 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan laju keausan signifikan lagi sebesar 50 % dibanding dengan proses DCT 4 jam (Liu, 2020).

4. KESIMPULAN

1. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki unsur utama yakni Fe sebesar 76,52%, unsur paduan utama Mn sebesar 14,11%, Al sebesar 10,62% dan Mo sebesar 0,45% sehingga paduan Fe-Al-Mn-Mo termasuk baja paduan tinggi.
2. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki struktur ferit dan austenite. Perendaman DCT menyebabkan struktur ferit semakin besar dan banyak sedangkan struktur austenite semakin kecil dan berkurang namun butir austenite akan semakin menyebar di antara butir ferit. Hal ini disebabkan karena selama proses DCT, terjadi rekristalisasi pada austenit dan ferit serta pertumbuhan butir pada ferit.

3. Paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki nilai kekerasan sebesar 455,92 kg/mm^2 . Proses DCT menurunkan kekerasan karena terjadinya perubahan austenit menjadi ferit, namun kekerasannya meningkat kembali seiring meningkatnya waktu DCT, akan tetapi rata-rata peningkatan kurang signifikan.
4. Paduan Fe-Al-Mn-Mo memiliki nilai laju keausan sebesar 0,00032 $\text{mm}^3/\text{kg.m}$. Hasil pengujian keausan menunjukkan bahwa semakin lama waktu proses DCT, maka nilai laju keausan semakin menurun karena selama proses DCT terjadi pelepasan internal stress dan pengurangan cacat struktur mikro.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin S1, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta serta kedua orang tua yang selama ini memberikan dukungan semangat dan dana sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Frommeyer, 2000, *Physical and Mechanical Properties of Iron-Aluminium-(Mn-Si) Lightweight Steels*, The 1999 ATS International Steelmaking Conference, Paris. Sec.4.
- [2]. Hwang, S. W., Ji, J. H., Lee, E.G., Park, K. T., 2011, Tensile deformation of a duplex Fe-20Mn-9Al-0.6C steel having the reduced specific weight, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 15, Hal. 5196-5203.
- [3]. Idayan, A., Gnanavelbabu, A., Rajkumar, K., 2013, *Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of AISI 440C Bearing Steel*, *Procedia Engineering*, Vol 97, Hal 1683 – 1691.
- [4]. Kartikasari, R., Sutrisna., Batseran, P.W., 2013, STRUKTUR MIKRO, KEKUATAN TARIK DAN KETAHANAN KOROSI PADUAN Fe-2,2Al-0,6C SETELAH PROSES TEMPER, SEMINAR NASIONAL ke-8 Tahun 2013 : Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi.
- [5]. Kim, H., Suh, D-W., dan Kim, N.J., 2013, *Fe-Al-Mn-C Lightweight Structural Alloys: A Review on the Microstructures and Mechanical Properties*, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 14, Hal. 1-11.
- [6]. Kobayashi, S., Zaefferer, S., Schneider, A., Raabe, D., and Frommeyer, G., 2005, *Optimisation of Precipitation for Controlling Recrystallization of Wrought Fe3Al Based Alloys*, *Intermetallics*, Vol. 13, Hal. 1296-1303.
- [7]. Leslie, T., 1983. *The Physical Metallurgy of Steels*, John Willey and Sons Inc., New York.
- [8]. Liu, Z., Zhang, Q., Meng, F., dan Miao, Z., 2020, *Research on Modification of Cryogenic Treatment on Austenitic Stainless Steel*, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 512, No. 1, Hal 1-7.
- [9]. Mabruhi, E., Anwar, M.S., Prifiharni, S., Romijarso, T.B., dan Adjiantoro, B., 2015, Pengaruh Mo dan Ni Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja Tahan Karat Martensik 13Cr, *Majalah Metalurgi*, Vol. 3, Hal. 133-140.
- [10]. Nadig, D. S., Bhat, M.R., K, P.V., dan Mahishi, C., 2017, *Effects of Cryogenic Treatment on the Strength Properties of Heat Resistant Stainless Steel (07X16H6)*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 229, Hal. 1-5.
- [11]. Shackelford, J.F., 1992, *Introduction to Material Science for Engineers*, 3th ed., McMillan Publishing Company, New York.
- [12]. Tjong, S.C., 1986, *Stress Corrosion Cracking behavior of the duplex Fe-10Al-29Mn-0,4C alloy in 20% NaCl solution at 100o C*, *Journal of Material Science*, Vol. 21, Hal. 1166-1170.
- [13]. 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.