

## Pengaruh Austenitisasi-Deep Cryogenic Treatment- Aging Terhadap Struktur Mikro, Ketahanan Korosi Dan Keausan Paduan Fe-11al-15

Anshory Muhammad Febryansyah<sup>1</sup>, Ratna Kartikasari<sup>2,\*</sup>, Wartono<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta  
Jalan Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta, 55281

\*Corresponding author: [ratna@itny.ac.id](mailto:ratna@itny.ac.id).

### Abstract

*Fe-Al-Mn alloy is used as a substitute for conventional stainless steel. The purpose of this research is to study the austenitization of Deep Cryogenic Treatment followed by aging of Fe- 11Al-15Mn alloy steel on microstructure, corrosion resistance, and wear. preparation of specimens for composition tests, microstructure tests, corrosion and wear resistance. The Deep Cryogenic Treatment process is carried out by immersion in liquid nitrogen temperature with time variations of 1 hour, 2 hours, 3 hours, 4 hours, and 5 hours, followed by aging. The tests carried out were the composition test, the microstructure test, and then continued with the corrosion resistance test using the weight loss method, and wear using the Ogoshi method. 7.93%, (Mn) 12.13%, so it is a high alloy steel. The Fe-11Al-25Mn alloy has an austenite and ferrite structure so it is included in the duplex stainless steel category. the lowest corrosion rate is 0.018 mpy with the Deep Cryogenic Treatment process with an immersion time of 3 hours. The wear test using the Ogoshi method of Fe-11Al-15Mn alloy has the highest wear value of raw material specimens of 0.00022 mm<sup>3</sup>/kg.m, while the lowest wear value is on the specimens of the Deep Cryogenic Treatment process with an immersion time of 5 hours, namely 0.000003 mm<sup>3</sup>/kg.m. The longer the Deep Cryogenic Treatment (DCT) process, the lower the wear value.*

**Keywords:** *Fe-Al-Mn alloy, deep cryogenic treatment, microstructure, corrosion resistance, wear.*

### Abstrak

Paduan Fe-Al-Mn digunakan sebagai pengganti baja tahan karat konvensional. Tujuan dari dilakukan penelitian ini adalah untuk mempelajari austenitisasi Deep Cryogenic Treatment yang dilanjut aging pada baja paduan Fe-11Al-15Mn terhadap struktur mikro, ketahanan korosi, dan keausan. Penelitian dimulai dari persiapan spesimen untuk uji komposisi, uji struktur mikro, ketahanan korosi dan keausan. Proses Deep Cryogenic Treatment dilakukan dengan perendaman dalam nitrogen cair temperature  $-196^{\circ}\text{C}$  dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam, dilanjutkan aging. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi, uji struktur mikro, setelah itu dilanjutkan uji ketahanan korosi dengan metode kehilangan berat, dan keausan dengan metode Ogoshi. Hasil pengujian komposisi menunjukkan paduan Fe-11Al-15Mn mengandung (Fe) 76,58%, (Al) 7,93%, (Mn) 12,13%, sehingga termasuk baja paduan tinggi. Paduan Fe-11Al-25Mn memiliki struktur austenit dan ferit sehingga termasuk kategori duplex stainless steel. Harga laju korosi tertinggi diperoleh

spesimen raw material sebesar 0,056 mpy , sedangkan harga laju korosi terendah 0,018 mpy dengan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 3 jam. Uji keausan dengan metode Ogoshi paduan Fe-11Al-15Mn memiliki nilai keausan tertinggi spesimen raw material sebesar 0,00022 mm<sup>3</sup>/kg.m, sedangkan nilai keausan terendah pada spesimen proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman 5 jam yaitu 0,00003 mm<sup>3</sup>/kg.m. Semakin lama waktu proses Deep Cryogenic Treatment (DCT) maka akan menyebabkan nilai keausan semakin rendah.

**Kata kunci:** Paduan Fe-Al-Mn, deep cryogenic treatment, struktur mikro, ketahanan korosi, keausan.

---

## PENDAHULUAN

Paduan Fe-Al-Mn mulai digunakan pada beberapa produk komersial yang membutuhkan berat yang ringan, ulet, dan memiliki kekuatan yang tinggi. Meskipun ketahanan korosi dari paduan Fe-Al-Mn lebih tinggi dibandingkan dengan baja karbon, ketahanan korosi paduan ini masih kalah dibandingkan dengan baja tahan karat. Karena ketahanan terhadap karat yang masih lebih rendah dibanding baja tahan karat, penggunaannya pada dunia industri masih terbatas (Su dkk, 2007). Fe-Al-Mn memiliki fasa yang terdiri dari ferit dan austenit, hal ini dikarenakan Mn adalah pembentuk dan penstabil austenit dan Al adalah pembentuk dan penstabil ferit. Semakin tinggi kadar Mn pada paduan maka semakin tinggi pula proporsi fasa austenit pada paduan. Jika paduan Fe-Al-Mn memiliki kadar Al yang rendah sedangkan kadar Mn tinggi fasa yang terbentuk adalah austenite pada temperatur ruang (Chiou dkk, 2004). Semakin tinggi kadar Al pada paduan Fe-Al-Mn hingga 10% Al menyebabkan fasa ferit pada paduan proporsinya meningkat. Pengaruh meningkatnya kadar Al pada paduan Fe-Al-Mn yaitu menurunkan densitas paduan, meningkatkan ketahanan korosi, dan kekuatan tarik yang dicapai hingga 780 Mpa dengan regangan hingga 30% (Seol dkk, 2012). Cryogenic treatment merupakan perlakuan panas pada baja yang melibatkan perendaman pada temperatur sub-zero pada selang waktu tertentu kemudian dipanaskan kembali pada temperatur ruang dan dilanjutkan dengan pemanasan (tempering) selama 1 hingga 2 jam. Cryogenic treatment merupakan perlakuan yang diberikan pada baja dengan tujuan untuk menghilangkan retained austenite yang terbentuk setelah proses perlakuan panas konvensional sehingga akan dihasilkan baja dengan struktur mikro martensit dengan persentase austenit sisa yang lebih rendah sehingga akan mendapatkan baja dengan kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik (Patil & Kumar, 2014). Paduan ferro lebih banyak diproduksi dibandingkan paduan logam lainnya. Penggunaan paduan ferro yang besar ini disebabkan oleh tiga faktor yaitu jumlah kandungan besi yang berada pada kerak bumi; besi dan paduannya kemungkinan diproduksi dengan ekstraksi, pemurnian, pemaduan, dan fabrikasi dengan ekonomis; serta paduan ferro sangatlah serbaguna disebabkan sifat fisik dan mekaniknya (Callister, 2000).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Baldissera dan Delprete (2008) Perbedaan mendasar di antara Cryogenic Treatment (CT) yang berbeda diberikan oleh parameter siklus pendinginan-pemanasan. Dalam dua keluarga tergantung pada suhu minimum yang dicapai selama siklus dikategorikan, Perawatan Kriogenik Dangkal (SCT) atau Subzero Treatment sampel ditempatkan dalam freezer pada suhu 193 K dan kemudian diekspos ke suhu kamar. Penelitian yang dikembangkan akhir-akhir ini lebih banyak mengutamakan peningkatan kekuatan dari baja dengan pemaduan beberapa elemen seperti penambahan Aluminium pada paduan Fe-C atau Fe-Mn-C untuk memperoleh kekuatan yang diinginkan. Paduan ini dinamakan high-Al steel, banyak digunakan pada frame kendaraan dan industri perkeretaapian (Phan dkk, 2014).

Selama proses cryotreatment pada baja, partikel karbida keras dan berukuran mikro dilepaskan dalam material dan mereka tersebar secara merata di seluruh volume. Selain itu,

austenit baja yang tidak dikonversi berubah menjadi struktur martensit yang kuat. Efek gabungan ini cenderung meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja (Nadig, 2017). Paduan Fe-Al-Mn lebih jauh dapat ditingkatkan kekuatannya dengan ageing heat-treatment, sedangkan pengaruh meningkatnya kadar Al pada paduan Fe-Mn-Al yaitu meningkatkan 20% lebih ringan dari pada stainless steel konvensional. Selain sifat mekanik yang baik paduan ini juga dilaporkan mempunyai ketahanan oksidasi yang sangat baik sampai dengan temperatur 850°C (Kartikasari, 2013).

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan bahan baja paduan Fe-11Al-15Mn berbentuk ingot dengan panjang 200 mm lebar 40 mm. Bahan dipotong menjadi 18 spesimen dimana 15 spesimen akan dilakukan proses austenitisasi-DCT-aging. Tahapan penelitian dimulai dari persiapan spesimen yaitu memotong paduan Fe-11Al-15Mn untuk uji komposisi, uji struktur mikro, ketahanan korosi dan keausan. Proses Deep Cryogenic Treatment dilakukan dengan perendaman dalam nitrogen cair pada temperature -196°C dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam, dilanjutkan aging selama 2 jam pada suhu 250°C. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi kimia dengan spectrometer, uji struktur mikro dengan mikroskop optik, setelah itu dilanjutkan uji ketahanan korosi dengan metode kehilangan berat, dan keausan dengan metode Ogoshi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Hasil Uji Komposisi Kimia

Uji komposisi kimia ini dilakukan untuk mengetahui persentase unsur-unsur yang terkandung didalam baja paduan Fe-11Al-15Mn yang dijadikan sebagai benda uji. Hasil dari pengujian komposisi kimia dapat dilihat pada tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Uji Komposisi Kimia Paduan Fe-11Al-15Mn.

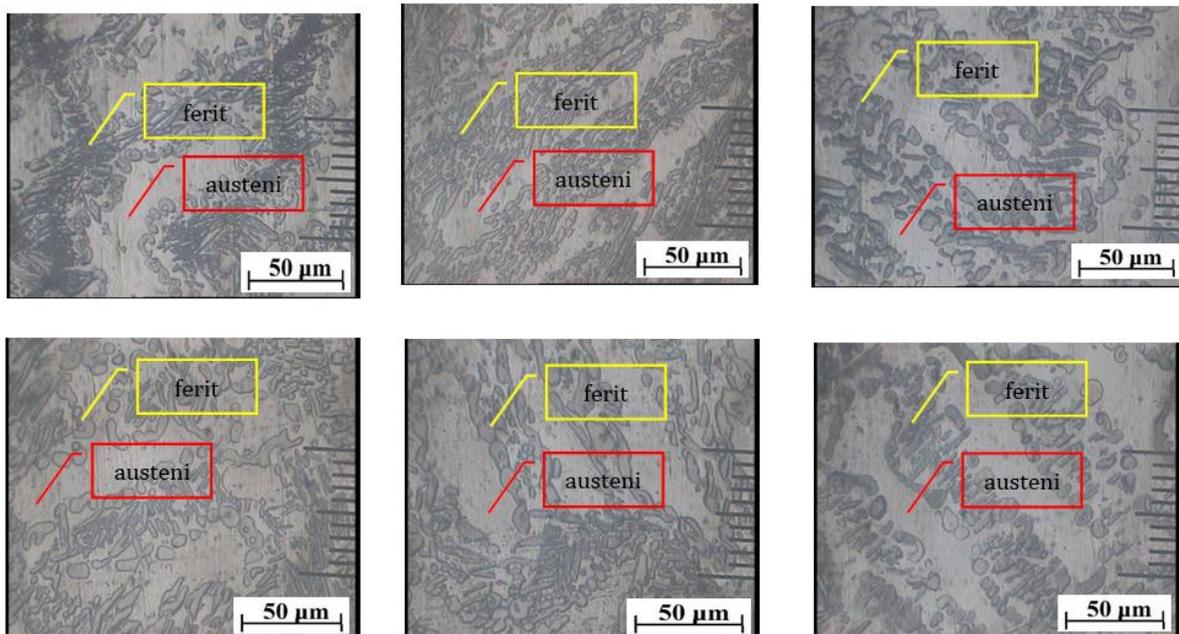
Unsur	W(% Berat)	Unsur	W (% Berat)
Fe	76,58	W	0,09
Al	7,93	N	0,10
Mn	12,13	Sb	0,07
C	0,89	Pb	0,05
Cr	0,14	Zn	0,02
P	0,05	Co	0,01
Ni	0,05	Mo	0,03
Nb	0,01	V	0,01
Si	1,69	Ti	0,01
Cu	0,13	S	0,01

Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-11Al-15Mn (Tabel 4.1), menunjukkan bahwa jumlah kadar unsur utama besi (Fe) sebesar 76,58%, unsur paduan utama aluminium (Al) 7,93%, mangan (Mn) 12,13% dan karbon (C) 0,89%. Jumlah unsur paduan utama ditambah kadar unsur paduan lain adalah sebesar 23,42%, sehingga paduan ini termasuk baja paduan tinggi (Smallman, 1991). Penambahan unsur aluminium (Al) sebagai pembentuk dan penstabil ferit ke dalam paduan Fe-Al-Mn sebesar 7,93%, meningkatkan sifat mampu keras dan ketahanan korosi.

Penambahan unsur mangan (Mn) yang merupakan unsur pembentuk dan penstabil austenit ke dalam paduan Fe-Al-Mn sebesar 12,13%, dalam sistem paduan membuat butiran lebih halus, meningkatkan kekuatan tarik tanpa mengurangi regangan, sehingga baja menjadi

semakin kuat dan ulet. Unsur karbon (C) dalam paduan ini sebesar 0,89% menyebabkan paduan ini mudah dibentuk karena kekuatannya relatif tinggi, keras dan getas (Avner, 1984). Unsur yang lain tidak berpengaruh terhadap sistem paduan karena kandungan yang ada tergolong relatif kecil.

### Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro



**Gambar 1.** Hasil foto struktur mikro spesimen baja paduan Fe-11Al-15Mn

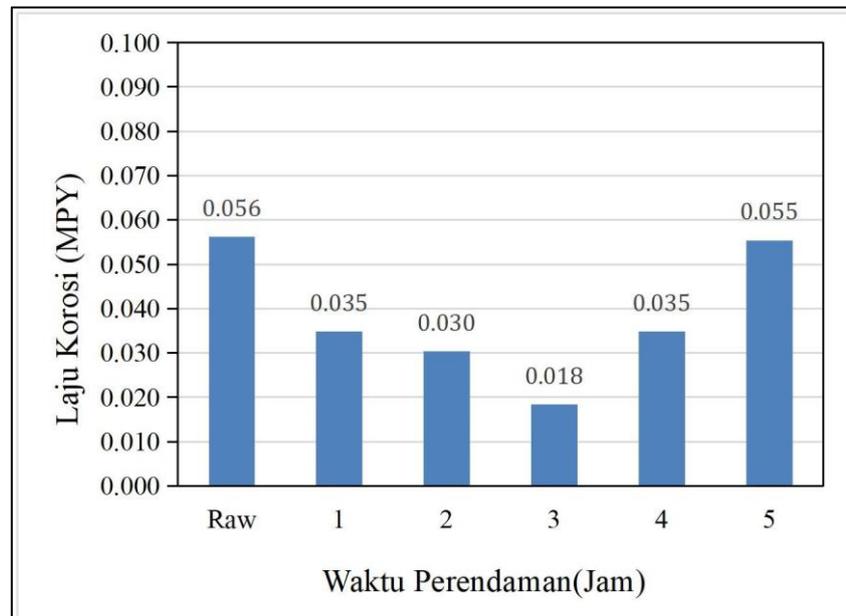
Hasil foto struktur mikro spesimen baja paduan Fe-11Al-15Mn menunjukkan bahwa spesimen raw material berstruktur austenit dan ferrit dimana struktur austenit berwarna putih terang sedangkan ferrit berwarna lebih gelap, ini dikarenakan unsur (Al) yang terkandung dalam paduan Fe-11Al-15Mn merupakan unsur pembentuk dan penstabil ferrit, juga unsur mangan (Mn) merupakan unsur pembentuk dan penstabil austenit. Selanjutnya untuk spesimen proses Austenitisasi tanpa proses deep cryogenic treatment, menunjukkan bahwa struktur yang terbentuk adalah austenit dan ferrit namun daerah butir ferrit terlihat lebih kecil-kecil mengelompok, sedangkan austenit memanjang mengikuti pola butir ferrit. Selanjutnya untuk spesimen proses DCT dengan waktu perendaman 1 jam menunjukkan struktur mikro yang terbentuk adalah ferrit yang telah tumbuh secara homogen menjadi lebih besar dan lebih menyebar di antara butir austenit.

Selanjutnya untuk spesimen proses DCT dengan waktu perendaman 2 jam menunjukkan struktur mikro yang terlihat adalah struktur austenit yang tumbuh secara homogen menjadi lebih besar dan menyebar di antara butir ferrit. Spesimen proses DCT dengan waktu perendaman 3 jam menunjukkan struktur ferrit yang terbentuk dengan besar dan butir yang relatif lebih kecil, diikuti dengan bertambahnya pertumbuhan austenit. Struktur austenit terlihat lebih rapat dan luasan daerah austenit yang besar dikarenakan tidak terhambatnya laju pertumbuhan butir. Selanjutnya untuk spesimen proses DCT dengan waktu perendaman 4 jam menunjukkan struktur yang terbentuk adalah austenit dengan pertumbuhan yang besar dan diikuti dengan bertambah besarnya butir ferrit. Selanjutnya untuk spesimen proses DCT dengan waktu perendaman 5 jam terlihat bahwa struktur yang terbentuk adalah austenit yang lebih dominan namun daerah besarnya austenit bertambah dan daerah butir ferrit mengecil. Semakin lama waktu perendaman akan mengubah besar butir struktur austenit menjadi dominan akan tetapi besar butir ferrit akan mengecil, dan akan mengubah kisi pada spesimen. Berdasarkan analisis hasil uji struktur mikro dapat diambil kesimpulan bahwa paduan Fe-11Al-15Mn termasuk

kategori duplex stainless steel. Hal ini dibuktikan oleh terbentuknya dua fasa struktur mikro yaitu struktur austenit dan juga struktur ferit.

### Analisis Hasil Pengujian Ketahanan Korosi

Pada Pengujian ketahanan korosi ini dilakukan dengan metode kehilangan berat. Pengujian ini dilakukan untuk dapat menganalisis laju korosi baja paduan Fe-11Al-15Mn terhadap media larutan NaCl dengan kadar sebesar 3,5%. Proses perendaman dilakukan dengan durasi selama 100 jam.



**Gambar 1.** Diagram Laju Korosi Fe-Al-Mn

Dari hasil pengujian korosi dapat diketahui bahwa, laju korosi tertinggi diperoleh pada spesimen raw material yaitu sebesar 0,056 mpy, tingginya laju korosi tersebut karena spesimen raw material berstruktur austenit dan ferit dimana ini dikarenakan unsur (Al) yang terkandung dalam paduan Fe-11Al-15Mn merupakan unsur pembentuk dan penstabil ferit, juga unsur mangan (Mn) merupakan unsur pembentuk dan penstabil austenit. Selanjutnya spesimen proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 1 jam, laju korosi mengalami penurunan 61,49% menjadi 0,035 mpy dibandingkan dari raw material. Hal ini dikarenakan ferit yang telah tumbuh secara homogen menjadi lebih besar dan lebih menyebar diantara butir austenit.

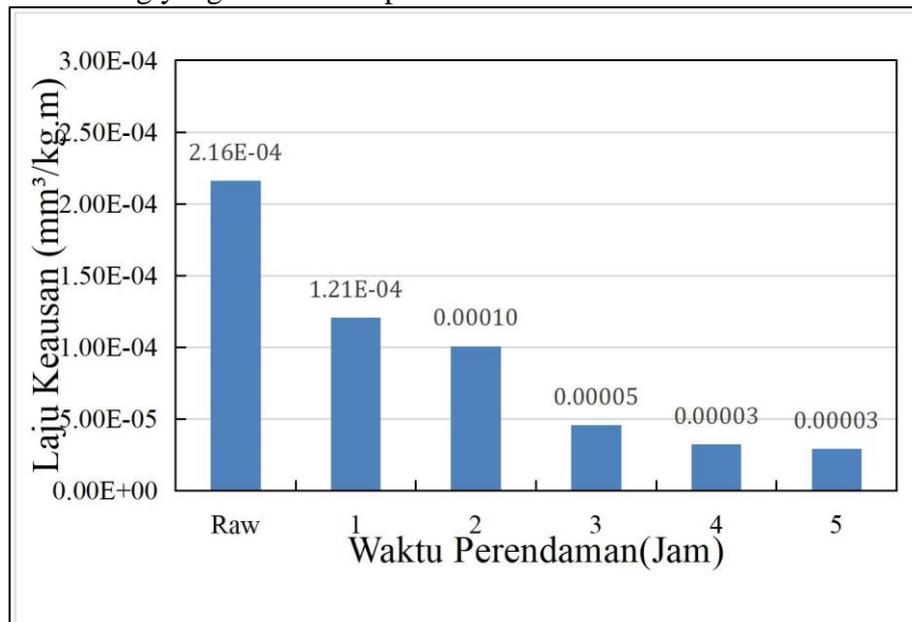
Selanjutnya untuk spesimen dengan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 2 jam, mengalami penurunan 14,85% menjadi 0,030 mpy dibandingkan proses Deep Cryogenic Treatment selama 1 jam. Hal ini dikarenakan struktur austenit yang tumbuh secara homogen dan memiliki besar butir austenit yang lebih besar, serta struktur ferit terlihat besar butirnya mengecil. Selanjutnya untuk spesimen dengan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 3 jam, mengalami penurunan laju korosi sebesar 64,67% menjadi 0,018 mpy dibandingkan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 2 jam. Hal ini dikarenakan struktur ferit yang terbentuk dengan besar butir yang relatif lebih kecil, diikuti dengan bertambahnya pertumbuhan austenit. Selanjutnya untuk spesimen proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 4 jam, mengalami kenaikan laju korosi sebesar 89,13% menjadi 0,035 mpy dibandingkan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 3 jam.

Kenaikan ini disebabkan austenit dengan pertumbuhan besar butir yang lebih besar dan diikuti dengan bertambah besarnya butir ferit. Selanjutnya untuk spesimen proses Deep

Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 5 jam, mengalami kenaikan laju korosi sebesar 59,19% menjadi 0,055 mpy dibandingkan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 4 jam. Kenaikan ini disebabkan daerah besarnya austenit bertambah dan daerah butir ferit mengecil. Semakin lama waktu perendaman akan mengubah besar butir struktur austenit menjadi dominan akan tetapi besar butir ferit akan mengecil.

### Analisis Hasil Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan menggunakan metode Ogoshi dimana benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (revolving disc). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji. Harga keausan diberlakukan pada tiga titik dalam bidang yang sama dan dipilih secara acak.



**Gambar 2.** Diagram Uji Keausan Paduan Fe-Al-Mn

Pada pengujian keausan menggunakan metode *Ogoshi* dengan beban pengujian 6,36 kg dengan jarak pengausan 15 mm. Setiap spesimen dilakukan pengujian pada 3 gesekan yang berbeda yang diatur secara acak. Berdasarkan spesimen paduan Fe-11Al-15Mn diperoleh hasil uji keausan pada spesimen *raw* material sebesar 0,00022 mm<sup>3</sup>/kg.m, kemudian hasil pengujian keausan pada spesimen proses *Deep Cryogenic Treatment* dengan waktu perendaman selama 1 jam yang dilanjutkan *aging* pada suhu 250° selama 2 jam sebesar 0,00012 mm<sup>3</sup>/kg.m, dimanaini mengalami penurunan keausan sebesar (45,45 %). Penurunan ini dikarenakan ferit yang telahtumbuh secara homogen menjadi lebih besar dan lebih menyebar diantara butir ferit Fe-Al akibat naiknya kadar Al.

Selanjutnya hasil pengujian keausan untuk spesimen proses *DeepCryogenic Treatment* dengan waktu perendaman selama 2 jam yang dilanjutkan *aging* pada suhu 250° selama 2 jam sebesar 0,00010 mm<sup>3</sup>/kg.m, dimana ini mengalami penurunan harga keausan sebesar 16,67 % dibandingkan dengan spesimen *Deep Cryogenic Treatment* dengan waktu perendaman 1 jam.. Penurunan ini dikarenakan struktur austenit yang tumbuh secara homogen dan memiliki besar butir austenit yang lebih besar, serta struktur ferit terlihat besar butirnya mengecil.Selanjutnya hasil pengujian keausan untuk spesimen proses *Deep Cryogenic Treatment* dengan waktu perendaman selama 3 jam yang dilanjutkan *aging* pada suhu 250° selama 2 jam sebesar 0,00005 mm<sup>3</sup>/kg.m, yang mana mengalami penurunan harga keausan sebesar 50% dibandingkan dengan proses *Deep Cryogenic Treatment* waktu perendaman selama 2 jam. Penurunan keausan ini dikarenakan struktur ferit yang terbentuk

dengan besar butir yang relatif lebih kecil, diikuti dengan bertambahnya pertumbuhan austenit.

Struktur austenit terlihat lebih rapat dan luasan daerah austenit yang besar dikarenakan tidak terhambatnya laju pertumbuhan butir. Selanjutnya untuk spesimen proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 4 jam yang dilanjutkan aging pada suhu 250° selama 2 jam mempunyai hasil pengujian keausan sebesar 0,00003 mm<sup>3</sup>/kg.m, dimana mengalami penurunan harga keausan sebesar 40% dibandingkan dengan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 3 jam. Penurunan ini dikarenakan austenit dengan pertumbuhan besar butir yang lebih besar dan diikuti dengan bertambah besarnya butir ferit. Selanjutnya untuk harga keausan pada spesimen proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 5 jam sebesar 0,00003 mm<sup>3</sup>/kg.m, dimana tidak mengalami perubahan hasil pengujian keausan dibandingkan proses Deep Cryogenic Treatment pada waktu perendaman selama 4 jam. Berdasarkan hasil pengujian keausan semua spesimen yang dapat dilihat pada gambar 5 dari spesimen raw material hingga spesimen proses Deep Cryogenic Treatment pada waktu perendaman selama 5 jam yang dilanjutkan aging pada suhu 250° selama 2 jam terus mengalami penurunan tingkat keausan dapat disimpulkan semakin lama waktu proses Deep Cryogenic Treatment (DCT) maka akan menyebabkan nilai keausan semakin rendah.

## **KESIMPULAN**

Kesimpulan Berdasarkan data penelitian beserta pembahasan yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian komposisi menunjukkan paduan Fe-11Al-15Mn mengandung (Fe) 76,58%, (Al) 7,93%, (Mn) 12,13%, (C) 0,89%, dengan jumlah unsur paduan >10% maka paduan Fe-11Al-15Mn merupakan baja paduan tinggi. Paduan Fe-11Al-25Mn memiliki struktur austenit dan ferit sehingga termasuk kategori duplex stainless steel. Spesimen raw material berstruktur austenit dan ferit dimana struktur austenit berwarna putih terang sedangkan ferit berwarna lebih gelap, ini dikarenakan unsur (Al) yang terkandung dalam paduan Fe-11Al-15Mn merupakan unsur pembentuk dan penstabil ferit, juga unsur mangan (Mn) merupakan unsur pembentuk dan penstabil austenit.
2. Harga laju korosi tertinggi diperoleh pada spesimen raw material yaitu sebesar 0,056 mpy, sedangkan harga laju korosi terendah 0,018 mpy terdapat pada spesimen dengan proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman selama 3 jam. Data Hasil Uji keausan dengan metode Ogoshi menunjukkan paduan Fe-11Al-15Mn memiliki nilai keausan tertinggi pada spesimen raw material sebesar 0,00022 mm<sup>3</sup>/kg.m, sedangkan nilai keausan terendah pada spesimen proses Deep Cryogenic Treatment dengan waktu perendaman 5 jam yaitu 0,00003 mm<sup>3</sup>/kg.m. Semakin lama waktu proses Deep Cryogenic Treatment (DCT) maka akan menyebabkan nilai keausan semakin rendah.

## **UCAPAN TERIMAKASIH**

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini. Terutama kepada Prodi Teknik Mesin S1 Fakultas Institut Teknologi Nasional Yogyakarta yang telah mendukung secara penuh sehingga terselesaikannya penelitian ini.

## **REFERENSI**

- Avner, S. H. 1984, Introduction to Physical Metallurgy. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- Baldissera, P., and Delprete, C., 2008, Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review, The Open Mechanical Engineering Journal, vol 1-2, Hal. 1-11.

- Callister Jr., W.D., 2000, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, Interactive e Text, John Wiley & Sons, 5th ed, Hal. 177 – 181.
- Chiou, S.T., Cheng, W.C., Lee, W.S., 2004, The analysis of the microstructure changes of a Fe– Mn–Al alloy under dynamic impact tests. *Materials Science and Engineering A*, Vpl.386, Hal 460-467.
- Kartikasari, R., Sutrisna, 2013, Pengaruh Temperatur Anil Terhadap Ketangguhan dan Ketahanan Korosi Kandidat Baja Ringan Paduan Fe-Al-Mn-Si, *Rotasi*, Vol. 15, No. 1, Hal. 11-15, Yogyakarta.
- Nadig, D.S., 2017, Effects of Cryogenic Treatment on the Strength Properties of Heat Resistant Stainless Steel (07X16H6), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol : 229.
- Patil, P I., dan B. Kumar. 2014, Deep Cryogenic Treatment of Alloy Steels: A Review. *International Journal of Electronics, Communication & Soft Computing Science and Engineering*, Vol. 2.
- Phan, A. T., Paek, M K., Kang, Y B. 2014, Phase Equilibria and Thermodynamics of the Fe– Al–C system: Critical Evaluation, Experiment and Thermodynamic Optimization, *Acta Materialia*, Vol. 79, Hal. 1-15
- Seol, J.B., Raabe, D., Choi, P., Park, H.S., Kwak, J.H., Park, C.G., 2012, Direct evidence for the formation of ordered carbides in a ferrite-based low-density Fe–Mn–Al–C alloy studied by transmission electron microscopy and atom probe tomography. *Scripta Materialia*, Vol. 68, Hal. 348-353.
- Su, C.W., Lee, J.W., Wang, C.S., Chao, C.G., Liu, T.F., 2007, The Effect of Hot-dipped Aluminum Coatings on Fe-8Al- 30Mn-0.8C Alloy, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, Hal. 1847-1852.