

Pengaruh Waktu Proses *Deep Cryogenic Treatment*- Temper Terhadap Struktur Mikro, Ketangguhan Dan Ketahanan Korosi Pada Paduan Fe-14Al-21,3Mn

Reza Renaldi¹, Ratna Kartikasari², Joko Pitoyo³

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta
Jl Babarsari Caturtunggal Depok Sleman, Yogyakarta 55281

Corresponding author: *ratna@itny.ac.id,

Abstract

Stainless steel is an alloy steel with at least 11.5% chromium by weight. Austenitic stainless steel is a steel containing 18% Cr and 8% Ni with a low carbon content. The alloy that is a candidate for replacing Fe-Cr-Ni is the Fe-Al-Mn alloy with the advantages of being able to work in medium to high temperature applications and relatively cheap prices. The Deep Cryogenic Treatment (DCT) process aims at increasing strength, greater dimensional stability or microstructural stability, wear resistance, hardness, toughness, fatigue life and compressive residual stresses. This study aims to analyze the effect of DCT processing time followed by tempering on the microstructure, toughness and corrosion resistance of Fe-14Al-21.3Mn alloy steel. The DCT process was carried out by immersion in liquid nitrogen at -196°C, for 1, 2, 3, 4, and 5 hours. Furthermore, the tempering process is carried out, namely heating at a temperature of 300°C for 1 hour and then cooling it to room temperature. Tests carried out are tests of microstructure, toughness and corrosion resistance. The results of microstructural testing using an optical microscope showed that the Fe-14Al-21.3Mn alloy after the DCT process was continued to temper, there were no changes in the microstructure, only changes in shape and size. Impact test results using the Charpy method showed that the Fe-14Al-21.3Mn alloy had an impact value of 0.130 J/mm. After 1 hour DCT-temper process the impact price increased by 0.159 J/mm. Then decreased at DCT-temper 2, 3, 4, 5 hours but not significant. The results of the corrosion resistance test for the Fe-14Al-21.3Mn alloy had a corrosion resistance value of 0.0457 mpy. After the DCT-temper process the corrosion resistance continued to increase until the maximum limit of the 4-hour DCT-temper was 0.0815 mpy, then decreased again at the 5-hour DCT-temper of 0.0699 mpy.

Keywords : Fe-14Al-21.3Mn Alloy, Deep Cryogenic Treatment, Temper

Abstrak

Baja tahan karat merupakan baja paduan dengan sedikitnya 11,5% kromium berdasarkan beratnya. Baja tahan karat austenik adalah baja yang mengandung 18% Cr dan 8% Ni dengan kadar karbon rendah. Paduan yang menjadi kandidat pengganti Fe-Cr-Ni adalah paduan Fe-Al-Mn dengan keunggulan dapat bekerja pada aplikasi temperature medium sampai tinggi dan harga yang relatif murah. Proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) bertujuan meningkatkan kekuatan, stabilitas dimensi yang lebih besar atau stabilitas struktur mikro, ketahanan aus, kekerasan, ketangguhan, umur kelelahan dan tegangan sisa tekan. Penelitian ini

bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu proses DCT yang dilanjutkan temper terhadap struktur mikro, ketangguhan dan ketahanan korosi baja paduan Fe-14Al-21,3Mn. Proses DCT dilakukan dengan perendaman dalam nitrogen cair pada suhu -196°C , selama 1, 2, 3, 4, dan 5 jam. Selanjutnya dilakukan proses temper yaitu pemanasan pada temperatur 300°C selama 1 jam kemudian didinginkan di suhu ruangan. Pengujian yang dilakukan adalah uji struktur mikro, ketangguhan dan ketahanan korosi. Hasil pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik menunjukkan bahwa paduan Fe-14Al-21,3Mn setelah proses DCT dilanjutkan tempertidak terjadi perubahan struktur mikro hanya perubahan bentuk dan ukuran. Hasil uji impak dengan metode *Charpy* menunjukkan bahwa paduan Fe-14Al-21,3Mn memiliki harga impak sebesar 0,130 J/mm. Setelah proses DCT-temper 1 jam harga impak naik sebesar 0,159 J/mm. Kemudian menurun pada DCT-temper 2, 3, 4, 5 jam namun tidak signifikan. Hasil uji ketahanan korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn memiliki nilai ketahanan korosi sebesar 0,0457 *mpy*. Setelah proses DCT-temper ketahanan korosi terus mengalami peningkatan sampai batas maksimum DCT-temper 4 jam sebesar 0,0815 *mpy*, kemudian menurun kembali pada DCT-temper 5 jam sebesar 0,0699 *mpy*.

Kata kunci : Paduan Fe-14Al-21,3Mn, *Deep Cryogenic Treatment*, Temper

PENDAHULUAN

Bahan logam dapat digolongkan menjadi dua tipe yaitu logam (ferro) besi dan (non ferro) logam bukan besi. Logam besi merupakan paduan yang tersusun dari besi (Fe) dengan karbon (C) dan juga mengandung berbagai unsur lain seperti mangan, fosfor, belerang dan lain-lain (Avner, 1984). Paduan ferro lebih banyak diproduksi dibandingkan paduan logam lainnya. Hal ini disebabkan oleh tiga faktor, diantaranya jumlah zat besi di kerak bumi, besi dan paduannya dapat diproduksi dengan pemurnian, pemaduan, dan fabrikasi yang murah; Dan paduan besi sangat fleksibel tergantung pada persyaratan fisik dan mekaniknya (Callister, 2001).

Paduan Fe-Al-Mn semakin banyak digunakan sebagai pengganti baja tahan karat dalam berbagai produk komersial yang membutuhkan kekuatan tinggi (Su dkk., 2008). Fe-Al-Mn memiliki fasa yang tersusun dari ferit dan austenit, hal ini dikarenakan Mn adalah yang pertama dan penstabil austenit dan Al adalah yang pertama dan penstabil ferit. Semakin tinggi kandungan Mn dalam paduan, semakintinggi proporsi fasa austenit dalam paduan. Ketika paduan Fe-Al-Mn memiliki kandungan Al yang rendah sedangkan kandungan Mn tinggi, fasa yang terbentuk adalah austenit pada temperatur ruang (Chiou dkk., 2004). Semakin tinggi kandungan Al pada paduan Fe-Al-Mn hingga 10% Al, semakin tinggi proporsi fasaferit pada paduan. Peningkatan kandungan Al dalam paduan Fe-Al-Mn membuatnya 20% lebih ringan dari baja tahan karat konvensional. Selain sifat mekanik yang baik, paduan ini dikatakan memiliki ketahanan oksidasi yang sangatbaik hingga suhu 850°C (Kartikasari dkk., 2013).

Deep Cryogenic Treatment (DCT) adalah proses untuk perlakuan dingin baja konvensional. Diterapkan untuk mengembangkan sifat-sifat komponen baja. Bahandidinginkan kisaran -80°C hingga -160°C dalam *Shallow Cryogenic Treatment* (SCT) dan -196°C dalam *Deep Cryogenic Treatment* (DCT). Proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) dikembangkan baru-baru ini dan banyak digunakan oleh industri perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanik, korosi dan perilaku elastis komponen baja (Sentilkumar dkk.m 2011). Pada penelitian ini akan dilakukan percobaan peningkatan karakteristik paduan Fe-Al-Mn dengan proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) dan dilanjutkan dengan proses temper dengan variasi temperatur.

Telah dilakukan penelitian tentang efek *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap ketahanan aus dan sifat mekanik baja perkakas AISI H13 (Adam, 2015). Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) meningkatkan daya tahan aus perekat dan sifat mekanik baja AISI H13. Pembentukan partikel karbida berukuran kecil yang terdistribusi secara merata dan transformasi austenit yang tertahan menjadi martensit memiliki

peran penting dalam meningkatkan ketahanan aus dan sifat mekanik. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis pengaruh waktu proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap struktur mikro, ketangguhan dan ketahanan korosi pada paduan Fe-Al-Mn.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian berupa ingot paduan Fe-14Al- 21,3Mn dengan ukuran panjang 190 mm lebar 25 mm dan tinggi 25 mm. Pengujian komposisi kimia dilakukan di PT. Itokoh Ceperindo dengan alat spectrometer. Setelah itu spesimen di potong menjadi spesimen uji struktur mikro sebanyak 6 spesimen, uji ketangguhan 6 spesimen dan uji ketahanan korosi sebanyak 6 spesimen dengan ukuran 10x10x5mm. Kemudian dilakukan proses DCT pada suhu -196°C dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam, setelah itu dilanjutkan proses temper dengan pemanasan 300°C di tahan 1 jam dan di dinginkan di udara. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan alat mikroskop optik, pengujian ketangguhan menggunakan metode *Charpy* dan pengujian ketahanan korosi dengan metode kehilangan berat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisi Uji Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur yang terkandung dalam paduan Fe-14Al-21,3Mn dengan menggunakan alat spectrometer, seperti pada Tabel. 1

Tabel. 1 Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-14Al-21,3Mn

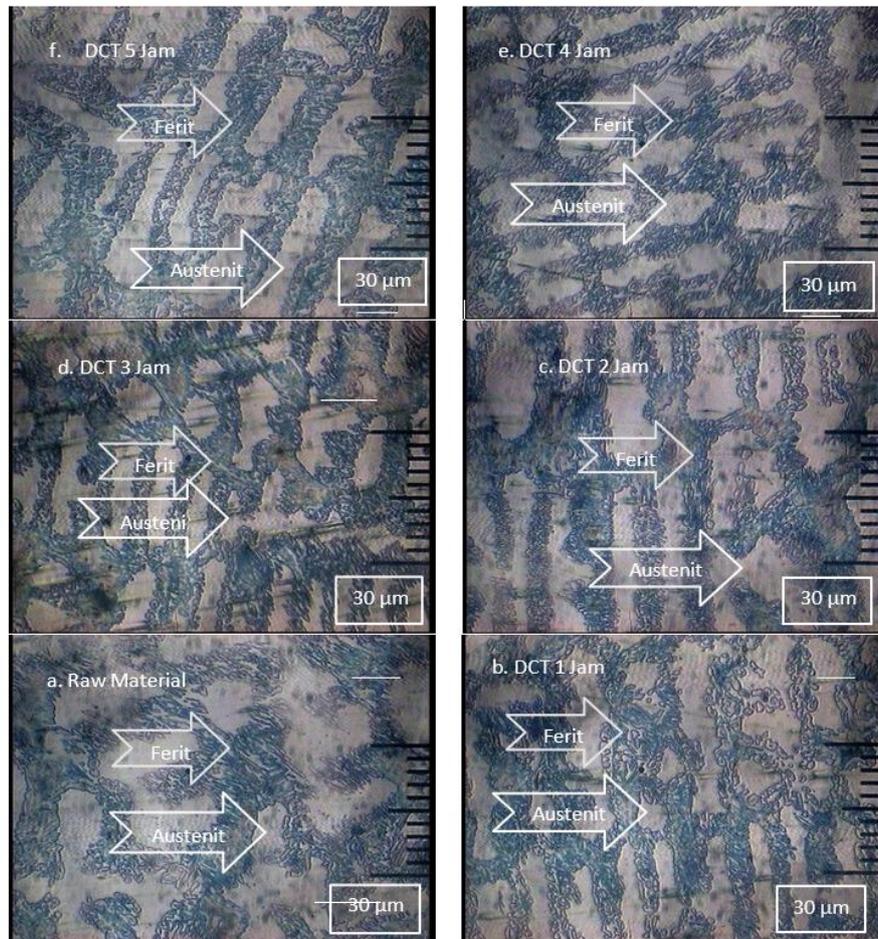
Waktu	W (%berat)
Fe	60,84
Al	14,17
Mn	21,34
C	1,12
Si	1,42
Cr	0,79
Ni	0,4
V	0,2
Mo	0,16
P	0,6
Ti	0,2
N	0,2
Total	100

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian komposisi kimia pada paduan Fe-14Al-21,3Mn yang menggunakan alat *spectrometer* menunjukkan cukup banyak unsur yang terkandung dalam spesimen tersebut. Unsur utama yang terkandung dalam spesimen tersebut adalah besi (Fe) 60,84%, unsur paduan utama aluminium (Al) 14,17%, mangan (Mn) 21,34% dan carbon (C) 1,12%. Jumlah unsur paduan utama ditambahkan kadar unsur lain adalah sebesar 39,16% sehingga paduan Fe-14Al-21,3Mn termasuk baja paduan tinggi (Smallman dkk., 2000). Pada material ini, 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, sedangkan karbon (C)

meningkatkan kekerasan namun getas pada baja serta membantu pembentukan struktur perlit. (Avner, 1984). Unsur Si, Ni, dan Cu dalam besi ditambahkan untuk meningkatkan keuletan setelah dilakukan perlakuan panas. Pada unsur yang lain karena jumlahnya sangat kecil maka tidak berpengaruh secara signifikan terhadap sifat paduan Fe-14Al- 21,3Mn (Surdja, 1995).

Analisis Hasil Uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro dilakukan dengan pengamatan menggunakan mikroskop optik setelah bahan melalui etsa. Penggunaan zat kimia yang digunakan untuk etsa berupa dengan perbandingan 1:3. Hasil pengujian struktur mikro paduan Fe-14Al-21,3Mn dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Uji Struktur Mikro Paduan Fe-14Al-21,3Mn sebelum dan sesudah proses DCT-temper

Hasil uji struktur mikro *raw material* pada Gambar 1.a menunjukkan bahwa pada paduan Fe-14Al-21,3Mn memiliki struktur ferit melingkar yang mengelilingi matriks dan austenite yang terlihat lebih besar dibandingkan dengan ferit. Hal ini dikarenakan Al berfungsi sebagai penstabil struktur ferit dan Mn berperan dalam menstabilkan struktur austenit. Pada perendaman DCT 1 jam dilanjutkan temper pada (Gambar 1.b) memperlihatkan bahwa struktur ferit dan austenite mengalami perubahan menjadi lebih kecil dengan pola yang memanjang. Terjadi perubahan yang signifikan dari struktur mikro pada raw material. Hal ini karena terjadinya proses rekristalisasi pada austenit dan ferit serta pertumbuhan butir selama proses DCT yang dilanjutkan temper (Maitano dkk., 2022). Pada perendaman DCT 2 jam dilanjutkan temper (Gambar.1.c) terlihat bahwa struktur ferit menjadi lebih kecil sedangkan struktur austenite membesar dengan pola memanjang. Hal ini disebabkan terjadinya proses rekristalisasi

secara simultan pada ferit sedangkan struktur austenite mengalami peningkatan pertumbuhan butir (Maitano dkk., 2022). Pada perendaman DCT 3 jam dilanjut temper (Gambar.1.d) terlihat bahwa struktur ferit dan austenite mengecil dengan pola memanjang, dimana proses rekristalisasi terus berlanjut dengan semakin lama waktu proses DCT (Maitano dkk., 2022).. Pada perendaman DCT 4 jam dilanjut temper (Gambar.1.e) terlihat bahwa struktur ferit dan austenite mengecil cenderung menjadi bulat, waktu proses DCT yang semakin lama menyebabkan terjadi perubahan butir ke arah equiaxed (membulat). Pada perendaman DCT 5 jam dilanjut temper (Gambar.1.f) terlihat bahwa struktur ferit dan austenite kembali membesar dan memanjang.

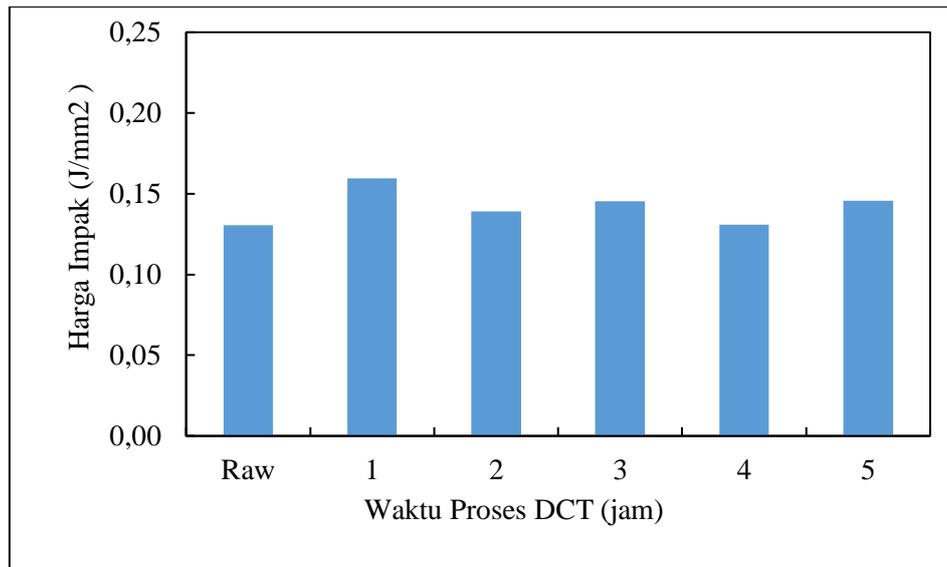
Berdasarkan hipotesis struktur yang terbentuk adalah struktur ferit yang mendominasi, ternyata hasil penelitian menyatakan bahwa setelah proses DCT di lanjutkan temper struktur yang terbentuknya tetap ferit dan austenite. Hal ini dikarenakan pengaruh Al sebagai unsur penstabil ferit dan Mn sebagai penstabil austenite yang sebelumnya lebih dominan (Chiou dkk., 2004). Hasil pengujian struktur mikro pada paduan Fe-14Al-21,3Mn menunjukkan bahwa semakin lama perendaman DCT dan dilanjut temper perubahan ferit menjadi dominan dan austenite mengecil namun perubahannya tidak signifikan.

Analisis Hasil Uji Ketangguhan

Pengujian impak adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan atau material dengan cara memberikan beban gaya yang satu sumbu, pengujian impak mempunyai tujuan untuk mengetahui kemampuan spesimen menyerap energi yang diberikan.

Tabel 2. Data hasil pengujian impak paduan Fe-14Al-21,3Mn

No.	Waktu Proses DCT (jam)	Sudut α (°)	Energi (J)	Sudut β (°)	Energi Terserap (J)	Luas (mm ²)	Harga Impact (J/mm ²)
1	Raw	151	300	148,50	3,5	27,0	0,130
2	1	151	300	148,00	4,3	26,7	0,159
3	2	151	300	148,25	3,9	27,9	0,139
4	3	151	300	148,50	3,5	24,2	0,145
5	4	151	300	148,50	3,5	26,9	0,131
6	5	151	300	148,25	3,9	26,7	0,146



Gambar 2. Diagram rata-rata hasil pengujian impact paduan Fe-14Al-21,3Mn

Tabel 2 dan Gambar 2 menunjukkan hasil perhitungan pengujian impact pada spesimen paduan Fe-14Al-21,3Mn *raw* material menunjukkan harga impact sebesar 0,130 J/mm². Pada proses DCT-temper 1 jam hasilnya naik menjadi 0,159 J/mm², terjadi peningkatan yang signifikan sebesar 22% di bandingkan dengan *raw* material, hal ini disebabkan karena struktur ferit dan austenite mengecil dengan pola yang memanjang, karena terjadinya proses rekristalisasi pada austenit dan ferit serta pertumbuhan butir. Pada proses DCT-temper 2 jam terjadi penurunan dari 0,159 J/mm² menjadi 0,139 J/mm², terjadi penurunan yang signifikan sebesar 12,5% dikarenakan terjadinya perubahan struktur ferit menjadi lebih kecil sedangkan struktur austenite membesar dengan pola memanjang yang signifikan.

Pada proses DCT-temper 3 jam terjadi peningkatan dari 0,139 J/mm² menjadi 0,145 J/mm² terjadi peningkatan yang tidak signifikan yaitu sebesar 4,31% dikarenakan terjadinya perubahan struktur ferit dan austenite mengecil dengan pola memanjang, tetapi perubahannya tidak signifikan. Pada perendaman DCT-temper 4 jam terjadi penurunan dari 0,145 J/mm² menjadi 0,131 J/mm² terjadi penurunan yang signifikan sebesar 9,65%, hal ini terjadi karena struktur ferit dan austenite mengecil cenderung menjadi bulat. Pada proses DCT-temper 5 jam terjadi peningkatan dari 0,131 J/mm² menjadi 0,146 J/mm², terjadi peningkatan yang signifikan sebesar 11,4%. Hal ini terjadi karena struktur ferit dan austenite membesar dan memanjang. Dari *raw* material meningkat di proses DCT-temper 1 jam kemudian menurun kembali sampai dengan proses DCT-temper 5 jam, karena dilihat dari struktur mikronya tidak ada perubahan yang signifikan pada waktu proses DCT-temper 2, 3, 4, 5 jam.

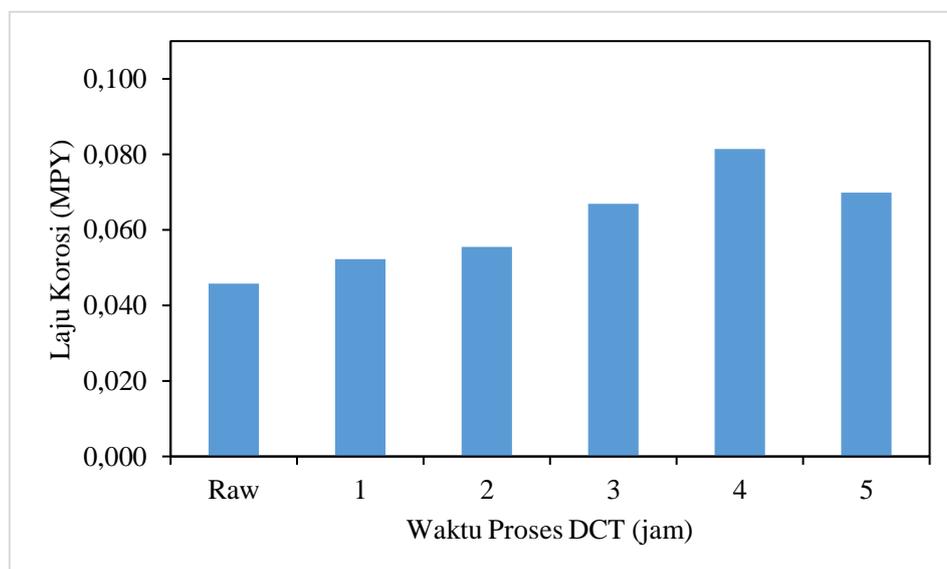
Berdasarkan data hasil pengujian impact pada spesimen Fe-14Al-21,Mn, *raw* material ke DCT 1 jam yang dilanjutkan dengan temper, menyebabkan terjadinya peningkatan harga impact yang signifikan sebesar 0,159 J/mm². Dikarenakan perubahan struktur mikro yang terjadi signifikan. Dan di proses DCT-temper 2, 3, 4, 5 jam terjadi penurunan harga impact namun tidak signifikan, dikarenakan perubahan struktur mikro yang tidak signifikan.

Analisis Hasil Uji Ketahanan Korosi

Laju korosi merupakan kecepatan rambat atau kecepatan penurunan kualitas bahan terhadap waktu. Dalam perhitungan laju korosi, satuan yang umumnya digunakan adalah mm/th (standar internasional), atau *mill/year* (mpy satuan *British*).

Tabel 3. Data hasil pengujian ketahanan korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn

No	Waktu Proses DCT (jam)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Kehilangan Berat (gr)	Luas Korosi (mm ²)	Laju Korosi (MPY)
1	Raw	10,777	10,766	0,011	105,88	0,0457
2	1	10,704	10,692	0,012	100,94	0,0523
3	2	10,871	10,858	0,013	103,12	0,0555
4	3	11,945	11,929	0,016	105,16	0,0669
5	4	11,240	11,220	0,020	108,01	0,0815
6	5	10,973	10,956	0,017	107,05	0,0699



Gambar 3. Diagram rata-rata hasil pengujian ketahanan korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn

Tabel 4. Kategori korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn (Fontana, 1987)

Tingkat ketahanan korosi	MPY	Konversi kesatuan-satuan lain			
		mm/tahun	μm /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
Tidak dianjurkan	200 +	5 +	5000 +	500 +	200 +

Tabel 3 dan Gambar 3 menunjukkan hasil uji korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn *raw* material menunjukkan bahwa laju korosi sebesar 0,0457 *mpy*. Dikarenakan terbentuknya struktur ferit melingkar yang mengelilingi matriks dan austenite. Selanjutnya pada proses

DCT-temper 1 jam hasilnya naik menjadi 0,0523 *mpy*, terjadi peningkatan laju korosi yang signifikan sebesar 14,4% di dibandingkan dengan *raw* material, hal ini disebabkan karena struktur ferit dan austenite mengecil dengan pola yang memanjang, karena terjadinya proses rekristalisasi pada austenit dan ferit serta pertumbuhan butir. Pada proses DCT-temper 2 jam laju korosi meningkat dari 0,0523 *mpy* menjadi 0,0555 *mpy*, terjadi peningkatan yang cukup signifikan sebesar 6,11% dikarenakan terjadinya perubahan struktur ferit menjadi lebih kecil sedangkan struktur austenite membesar dengan pola memanjang yang cukup signifikan.

Pada proses DCT-temper 3 jam laju korosi meningkat lagi dari 0,0555 *mpy* menjadi 0,0669 *mpy*, terjadi peningkatan yang signifikan yaitu sebesar 20,5% dikarenakan terjadinya perubahan struktur ferit dan austenite mengecil dengan pola memanjang. Pada perendaman DCT-temper 4 jam terjadi peningkatan laju korosi dari 0,0669 *mpy* menjadi 0,0815 *mpy*, terjadi peningkatan yang signifikan sebesar 21,8%, hal ini terjadi karena struktur ferit dan austenite mengecil cenderung menjadi bulat. Pada proses DCT-temper 5 jam terjadi penurunan laju korosi dari 0,0815 *mpy* menjadi 0,0699 *mpy*, terjadi penurunan yang signifikan sebesar 14,2%. Hal ini terjadi karena struktur ferit dan austenite membesar dan memanjang.

Berdasarkan dari data hasil pengujian ketahanan korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn, *raw* material ke DCT 1 jam yang dilanjutkan dengan temper menunjukkan hasil tertinggi pada spesimen dengan perendaman DCT-temper 4 jam sebesar 0,0815 *mpy*, hasil ini sangat berbeda dengan laju korosi pada spesimen *raw* material. Proses DCT-temper meningkatkan maksimum laju korosi pada DCT-temper 4 jam, kemudian menurun pada DCT-temper 5 jam mencapai laju korosi 0,0699 *mpy*. Pada DCT-temper 1, 2, 3, 4 jam artinya proses DCT-temper meningkatkan ketahanan korosi, tetapi ketahanan korosi menurun pada DCT-temper 5 jam.

Tabel 4 menunjukkan hasil uji korosi baik di *raw* material maupun hasil proses DCT-temper 1, 2, 3, 4, 5 jam termasuk kategori luar biasa baik (Fontana, 1988). Terjadi perubahan yang signifikan antara *raw* material dan DCT-temper 1, 2, 3, 4, 5 jam dan memperoleh hasil tertinggi pada DCT-temper 4 jam sebesar 0,0815 *mpy*.

KESIMPULAN

1. Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa paduan Fe-14Al-21,3Mn memiliki unsur utama Fe sebesar 60,84%, unsur paduan utama Al sebesar 14,17% dan Mn sebesar 21,34% sehingga paduan Fe-14Al-21,3Mn termasuk baja paduan tinggi.
2. Struktur mikro paduan Fe-14Al-21,3Mn terdiri atas struktur ferit dan austenite. Setelah proses DCT yang dilanjutkan temper tidak merubah struktur mikro tetapi merubah bentuk dan ukuran dimana semakin lama waktu proses DCT-temper perubahan ferit menjadi dominan dan austenite mengecil.
3. Hasil uji impak dengan metode *Charpy* menunjukkan bahwa paduan Fe-14Al-21,3Mn memiliki harga impak sebesar 0,130 J/mm. Setelah proses DCT-temper 1 jam harga impak naik sebesar 0,159 J/mm. Kemudian menurun pada DCT-temper 2, 3, 4 dan 5 jam.
4. Hasil uji ketahanan korosi paduan Fe-14Al-21,3Mn memiliki nilai ketahanan korosi sebesar 0,0457 *mpy*. Setelah proses DCT-temper ketahanan korosi terus mengalami peningkatan sampai batas maksimum DCT-temper 4 jam sebesar 0,0815 *mpy*, kemudian menurun kembali pada DCT-temper 5 jam sebesar 0,0699 *mpy*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prodi Teknik Mesin S-1 Institut Teknologi nasional Yogyakarta, keluarga tercinta, dan teman-teman semuanya yang telah memberikan dukungan hingga terselesainya karya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Avner, S. H., 1984, *Introduction to physical metallurgy*. New York : McGraw-Hill international Book Company.
- Callister, Jr. W.D., 2001, *Materials Science and Engineering An Introduction*, 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc, New York.
- Su, C.W., Lee, J.W., Wang, C.S., Chao, C.G., Liu, T.F. 2008. *The effect of hot- dipped aluminum coatings on Fe-8Al30Mn-0.8C alloy*, *Surface & Coatings Technology*, Vol, 199, No. 202, Hal. 1847–1852.
- 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* Vol. 386, No. 460, Hal. 467.
- Kartikasari, R., Sutrisna., 2013, Pengaruh Temperatur Anil Terhadap Ketangguhan dan Ketahanan Korosi Kandidat Baja Ringan Paduan Fe-Al- Mn-Si, *Rotasi Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 15, No. 1, Hal. 11-15.
- Senthilkumar D., Rajendran I, 2011, *Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on Tribological Behavior of En 19 Steel*, *Journal of Iron and Steel Resarch Internasional*, Vol. 9, Hal. 53-59.
- Adam, 2015, *Effects of Deep Cryogenic Treatment on the Wear Resistance and Mechanical Properties of AISI H13 Hot-Work Tool Steel* *Jurnal Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, Hal. 4431.
- Smallman, R.E., dan Bishop, R.j., 2000, “Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material”, Erlangga, jakarta.
- Surdia, T., (1995) Pengetahuan Bahan Teknik. PT Pradnya Paramita. Jakarta.
- Maitano, A. F. D., Kartikasari, R., & Muhfidin, R. 2022, Pengaruh Waktu Proses *Deep Cryogenic Treatment* Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, dan Keausan Paduan Fe-Al- Mn-Mo. *ReTII*, Hal. 56-61
- Fontana, G.M., 1988, *Corrosion Engineering*, 3th ed., McGraw Hill Inc.,Singapore.