

Pengaruh Waktu Proses Austemper Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, Dan Kekuatan Paduan Fe-1Al-6,9C

Jeremia Yakin Berkat Zandroto¹, Ratna Kartikasari², Wartono³

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

Korespondensi : ratna@itny.ac.id, jeremiazand06@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu proses austemper terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan besi tuang paduan Fe-1Al-6,9C. Proses yang dilakukan adalah austemper yang dimulai dengan pemanasan pada $T 900^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam, dilanjutkan pencelupan dalam garam cair (KNO_3 55% + NaNO_3 45%) pada $T 300^{\circ}\text{C}$ selama 10, 15, 20, 25, 30 menit, diakhiri dengan pencelupan dalam air. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi kimia menggunakan spectrometer, uji struktur mikro dengan mikroskop optik, uji kekerasan dengan metode Brinell, dan pengujian tarik. Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-1Al-6,9C menunjukkan bahwa kadar unsur utama besi (Fe) 89,40%, dan unsur paduan utama aluminium (Al) 0,98%, karbon (C) 6,94%. Struktur mikro paduan Fe-1Al-6,9C terdiri atas struktur ferit, perlit dan grafit, setelah proses austemper struktur perlit berubah menjadi bainit. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa proses austemper meningkatkan nilai kekerasan dan mencapai maksimum ($407,44 \text{ Kg/mm}^2$) pada penahanan selama 30 menit dalam garam cair. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa paduan Fe-1Al-6,9C memiliki nilai tegangan dan regangan sebesar 76,5 Mpa dan 6,68%, proses austemper menurunkan nilai tegangan dan regangan sehingga mencapai nilai terendah (37,07 Mpa dan 3,2%) pada penahanan selama 25 menit dalam garam cair.

Kata kunci— Paduan Fe-1Al-6,9C, Austemper, Struktur Mikro, Kekerasan, Kekuatan

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of austemper processing time on the microstructure, hardness, and strength of Fe-1Al-6.9C alloy cast iron. The process carried out is austemper starting with heating at $T 900^{\circ}\text{C}$ for 1 hour, followed by immersion in molten salt (KNO_3 55% + NaNO_3 45%) at $T 300^{\circ}\text{C}$ for 10, 15, 20, 25, 30 minutes, ending with immersion in water. The tests carried out were chemical composition test using a spectrometer, microstructure test with an optical microscope, hardness test using the Brinell method, and tensile testing. The results of testing the chemical composition of the Fe-1Al-6.9C alloy showed that the content of the main element iron (Fe) was 89.40%, and the main alloying element was aluminum (Al) 0.98%, carbon (C) 6.94%. The microstructure of Fe-1Al-6.9C alloy consists of ferrite, pearlite and graphite structures, after the austemper process the pearlite structure changes to bainite. The results of the hardness test showed that the austemper process increased the hardness value and reached a maximum (407.44 Kg/mm^2) on holding for 30 minutes in molten salt. Tensile test results show that Fe-1Al-6.9C alloy has stress and strain values of 76.5 MPa and 6.68%, the austemper process reduces stress and strain values so that it reaches the lowest values (37.07 MPa and 3.2%) on holding for 25 min in molten salt.

Keyword : Alloy Fe-1Al-6,9C, Austemper, Microstructure, Hardness, and Strength

1. PENDAHULUAN

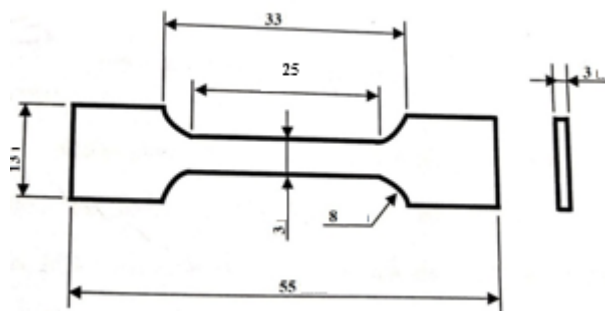
Besi tuang adalah paduan besi dan karbon dengan kandungan karbon berkisar antara 2,0 – 6,67 %. Besi tuang berdasarkan struktur mikro dibagi dalam empat golongan yaitu: besi tuang kelabu (*grey cast iron*), besi tuang nodular (*nodular cast iron*), besi tuang putih (*white cast iron*), besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*) [10]. Besi tuang kelabu diproses melalui pendinginan lambat sehingga membentuk struktur ferit, perlit dan grafit. Besi tuang kelabu memiliki salah satu karakteristik pada bidang patahannya yang terjadi akibat rambatan retak yang melintasi satu serpih ke serpih lainnya, karena sebagian besar patahan tersebut melewati serpih-serpih grafit maka permukaan patahan tersebut berwarna kelabu sehingga disebut besi tuang kelabu. Besi tuang kelabu memiliki sifat yang mampu meredam getaran, mampu menyerap panas, tahan aus atau gesekan tapi juga bersifat getas (*brittle*), dan keuletan (*ductility*) rendah. Besi tuang kelabu banyak diaplikasikan dalam pembuatan blok mesin, perkakas, dan rangka mesin (Widikda, 2020). Keterbatasan aplikasi disebabkan sifat besi tuang kelabu yang getas (*brittle*), sehingga perlu dilakukan beberapa upaya, antara lain menambahkan unsur paduan seperti Al (aluminium). Seperti diketahui aluminium merupakan unsur ketiga di bumi dan harganya relatif murah [12]. Lebih dari itu aluminium dikenal sebagai penstabil struktur *ferrite* juga dapat meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi [6].

Upaya penggantian unsur Cr pada baja tahan karat dengan Al. Paduan Fe-Al-C merupakan paduan baru kandidat pengganti *ferritic stainless steel*, densitas yang rendah membuat paduan Fe-Al-C juga dikandidatkan

sebagai *lightweight steel* (baja ringan) [8]. Paduan Fe-Al-C merupakan kandidat yang menjanjikan untuk menggantikan beberapa jenis *stainless steel* konvensional pada aplikasi temperatur medium sampai tinggi [7]. Paduan Fe-Al-C memiliki sifat yang keras tetapi sangat getas (*brittle*), untuk memodifikasi sifat getas perlu dilakukan perlakuan panas (*heat treatment*). Pada penelitian ini perlakuan panas yang dilakukan adalah proses austemper pada besi tuang kelabu paduan Al (Fe-1Al-6,9C), proses austemper merupakan perlakuan panas isothermal yang mengacu pada pembentukan struktur bainit. Ukuran grafit besi cor kelabu terhadap laju keausan mengatakan bahwa struktur ferit dalam besi tuang kelabu sangat ulet, tetapi kekerasannya sangat rendah, struktur perlit mempunyai kombinasi kekerasan dan keuletan yang baik tetapi nilainya masih rendah, sementit dan martensit mempunyai kekerasan yang tinggi tetapi sangat getas, struktur bainit mempunyai kombinasi nilai kekerasan dan keuletan terbaik sehingga untuk penggunaan besi cor kelabu dengan tuntutan nilai kekerasan dan kekuatan impact yang tinggi, besi tuang kelabu dengan struktur bainit lebih unggul dibandingkan struktur lainnya [10].

2. METODE PENELITIAN

Bahan baku penelitian adalah besi paduan Fe-1Al-6,9C dalam bentuk ingot dengan ukuran 4cm x 4,2cm x 18,7cm. Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan alat *spectrometer* milik PT. Itokoh Ceperindo, Klaten. Besi paduan Fe-1Al-6,9C selanjutnya dipotong membentuk spesimen uji struktur mikro dan uji kekerasan dengan ukuran panjang 10mm, lebar 10mm, tebal 5 mm, dan uji kekuatan tarik dibentuk menjadi spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E8 (Gambar 1). Proses Austemper dimulai dengan proses pemanasan pada temperatur 900°C selama 1 jam kemudian dicelupkan kedalam garam cair (KNO₃ 55% + NaNO₃ 45%) selama 10 menit, 15 menit, 20 menit, 25 menit, 30 menit, kemudian dilanjut pendinginan air. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian struktur mikro menggunakan alat mikroskop optik, uji kekerasan dengan metode *Brinell*, dan uji kekuatan tarik menggunakan alat uji tarik milik Laboratorium Bahan Teknik Jurusan Teknik Mesin Program D3 UGM.



Gambar 1. Spesimen uji tarik

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Analisis Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kandungan unsur-unsur kimia yang ada pada material logam. Pengujian ini dilakukan pada paduan Fe-1Al-6,9 C menggunakan alat *spectrometer*.

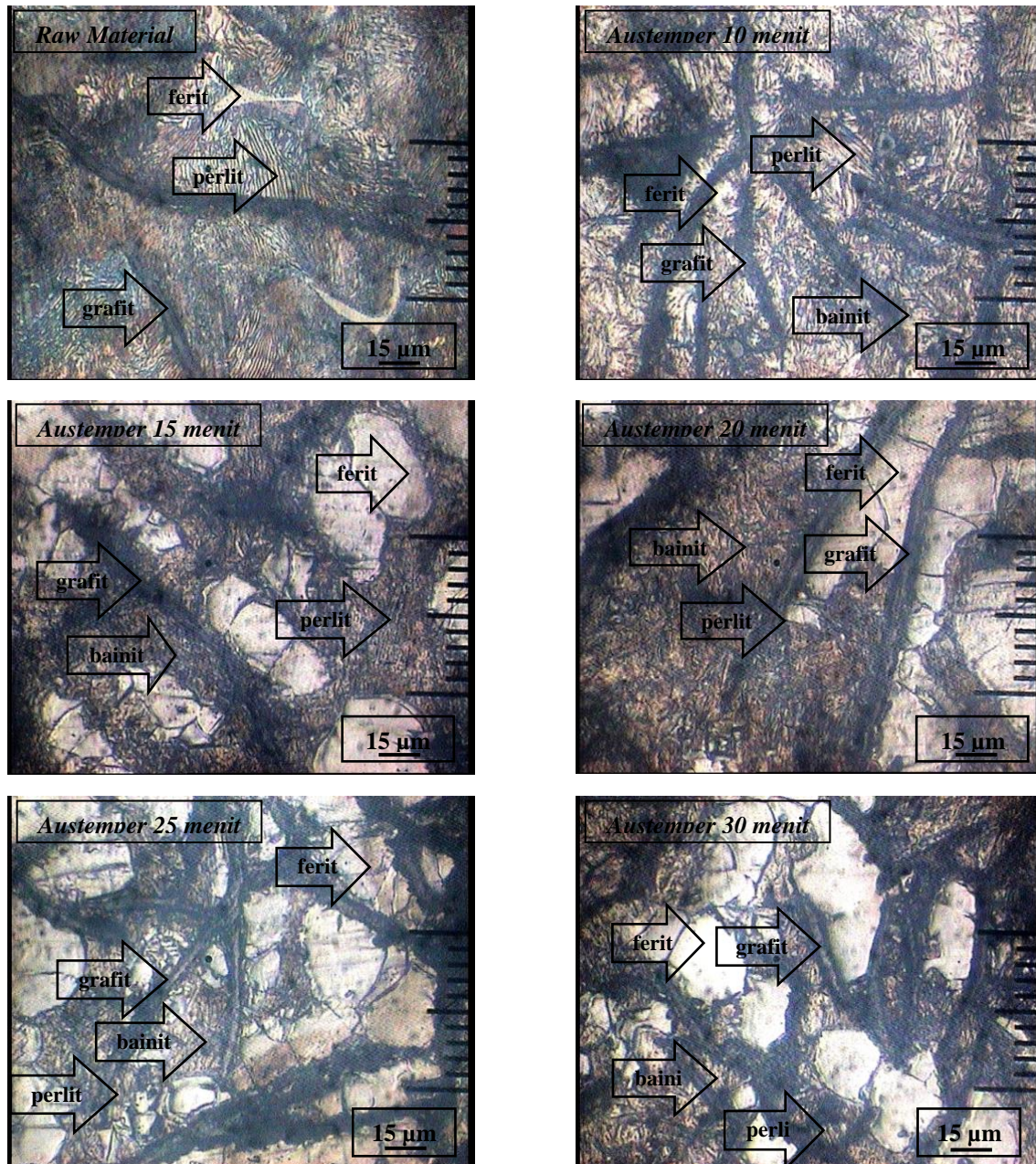
Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia paduan Fe-1Al-6,9C

Unsur	Fe	C	Al	Si	Ni	S	Cr	V	Mn	Mo	P	Cu	Ti	Zn
% Berat	89,40	6,94	0,98	1,69	0,10	0,03	0,11	0,01	0,46	0,01	0,04	0,14	0,01	0,01

Kandungan karbon (C) lebih dari 2% yaitu 6,94% maka paduan Fe-1Al-6,9C disebut sebagai besi tuang [1]. Kehadiran aluminium (Al) pada baja dapat berfungsi menstabilkan ferit, meningkatkan ketahanan oksidasi dan reduksi [3]. Penambahan unsur karbon (C) menyebabkan paduan lebih mudah teroksidasi, dengan matriks ferit bersifat *Brittle* serta mempunyai *strength* rendah pada temperatur tinggi [15]. Kehadiran silicon (Si) dalam besi cor mengakibatkan terjadinya dekomposisi karbida menjadi besi dan grafit [11]. Si diatas 3,25% akan meningkatkan kekerasan dan mengurangi kekuatan impact serta meningkatkan sifat mampu besi cor [13].

3.1. Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro bertujuan untuk mengetahui bentuk dan ukuran kristal logam, kerusakan logam yang diakibatkan adanya proses deformasi, perbedaan komposisi, dan perlakuan panas [2]. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan alat *mikroskop optik* dengan pembesaran 200x berjumlah 6 spesimen dimana 1 spesimen raw material, 5 spesimen perlakuan panas austemper pada temperatur 900°C dilanjutkan pencelupan pada garam cair temperatur 300°C dengan variasi waktu 10, 15, 20, 25, dan 30 menit.



Gambar 2. Foto struktur mikro paduan Fe-1Al-6,9C sebelum dan setelah proses *austemper*

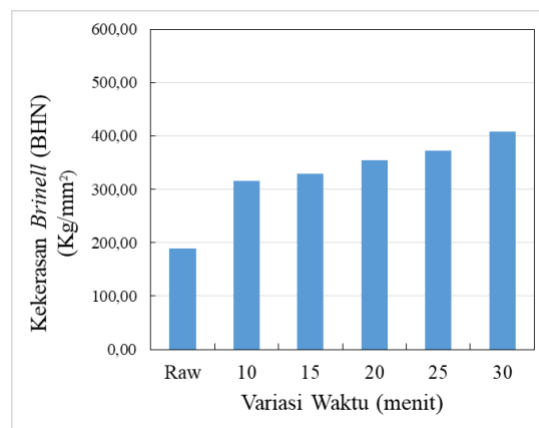
Hasil pengujian struktur mikro *raw material* menunjukkan bahwa pada paduan Fe-1Al-6,9C terdapat struktur ferrit, perlit, dan grafit yang dapat dilihat pada Gambar 2. Munculnya ketiga struktur ini disebabkan oleh unsur-unsur yang terkandung dalam paduan yaitu unsur Al berfungsi sebagai pembentuk dan penstabil struktur ferrit, unsur C mendorong terbentuknya struktur perlit, dan unsur Si berfungsi membentuk struktur grafit. Hasil pengujian struktur mikro paduan Fe-1Al-6,9C dapat disimpulkan bahwa setelah proses *austemper* pada temperatur 900°C selama 1 jam dilanjut penahanan dalam garam cair temperatur 300°C struktur perlit berubah menjadi struktur bainit, semakin lama penahan dalam garam cair terlihat bahwa struktur perlit hampir tidak terlihat dan struktur bainit lebih dominan, serta struktur ferrit semakin membesar dan dominan dibanding struktur lainnya dikarenakan adanya unsur aluminium (Al) sebesar 0,98% pada paduan [3], namun pada penahanan 30 menit dalam garam cair sudah tidak terjadi pertumbuhan butir.

3.3 Analisis Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan material bertujuan untuk mengetahui angka kekerasan suatu bahan, perlakuan panas terhadap kekerasan bahan. Pengujian kekerasan yang dilakukan pada penelitian ini adalah metode pengujian *Brinell* menggunakan alat *universal hardness tester* dengan pembebanan 187,5 kgf.

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan *Brinell* paduan Fe-1Al-6,9C

Variasi Waktu Austemper	Titik Uji	Diameter indentasi (d) (mm)	Kekerasan (BHN) (Kg/mm ²)	Kekerasan rata-rata (BHN) (Kg/mm ²)
Raw	1	1,11	183,781	188,89
	2	1,06	202,552	
	3	1,12	180,324	
10 menit	1	0,86	313,095	315,65
	2	0,85	320,746	
	3	0,86	313,095	
15 menit	1	0,84	328,671	328,77
	2	0,83	336,884	
	3	0,85	320,746	
20 menit	1	0,80	363,396	354,56
	2	0,83	336,884	
	3	0,80	363,396	
25 menit	1	0,80	363,396	373,03
	2	0,78	382,794	
	3	0,79	372,911	
30 menit	1	0,75	414,849	407,44
	2	0,76	403,742	
	3	0,76	403,742	

**Gambar 3.** Diagram rata-rata pengujian kekerasan *Brinell* paduan Fe-1Al-6,9C

Tabel 2 dan Gambar 3 menunjukkan hasil pengujian kekerasan *Brinell* Fe-1Al-6,9C pada spesimen raw material dan perlakuan panas austemper pada temperatur 900°C selama 1 jam dilanjutkan pencelupan pada garam cair bertemperatur 300°C dengan variasi waktu 10, 15, 20, 25, dan 30 menit. Pengujian dilakukan pada 3 titik berbeda untuk masing-masing spesimen, hasil rata-rata pengujian kekerasan raw material sebesar 188,89 Kg/mm², hal ini disebabkan struktur yang terbentuk pada spesimen raw material adalah struktur ferit, perlit, dan grafit, dimana struktur perlit terlihat dominan dan menyebar dibanding struktur lainnya, ukuran butir struktur ferit lebih tipis serta jarak struktur grafit lebih longgar. Hasil pengujian kekerasan pada penahanan selama 10 menit dalam garam cair adalah 315,65 Kg/mm², angka ini naik signifikan sebesar 67,10% dari angka kekerasan raw material. Hal ini dikarenakan struktur ferit lebih dominan dan struktur perlit berubah menjadi struktur bainit karena proses austemper serta ukuran grafit lebih besar dan lebih rapat. Pada penahanan selama 15 menit dalam garam cair hasil pengujian kekerasan *Brinell* adalah 328,77 Kg/mm², angka ini naik sebesar 4,15% dari penahanan selama 10 menit. Hal ini disebabkan ukuran butir ferit lebih besar dan dominan serta struktur perlit yang hampir semua berubah

menjadi struktur bainit, dan ukuran grafit lebih besar. Pada penahanan selama 20 menit dalam garam cair hasil pengujian kekerasan *Brinell* adalah 354,56 Kg/mm², angka ini naik signifikan sebesar 7,84% dari penahanan selama 15 menit. Hal ini disebabkan ukuran butir ferit lebih besar dan dominan, struktur grafit lebih besar dan lebih rapat, serta struktur bainit lebih dominan dibanding struktur perlit.

Pada penahanan selama 25 menit dalam garam cair hasil pengujian kekerasan *Brinell* adalah 373,03 Kg/mm², angka ini naik signifikan sebesar 5,20% dari penahanan selama 20 menit. Hal ini disebabkan struktur ferit yang lebih dominan dibanding struktur lainnya, struktur grafit lebih rapat, dan struktur perlit yang hampir tidak terlihat, serta struktur bainit menyebar dibawah batas butir. Pada penahanan selama 30 menit dalam garam cair hasil pengujian kekerasan *Brinell* adalah 407,44 Kg/mm², angka ini naik signifikan sebesar 9,22% dari penahanan selama 25 menit. Hal ini disebabkan struktur ferit yang lebih dominan dibanding struktur lainnya, struktur perlit hampir tidak terlihat dikarenakan menjadi struktur bainit, serta struktur grafit lebih rapat.

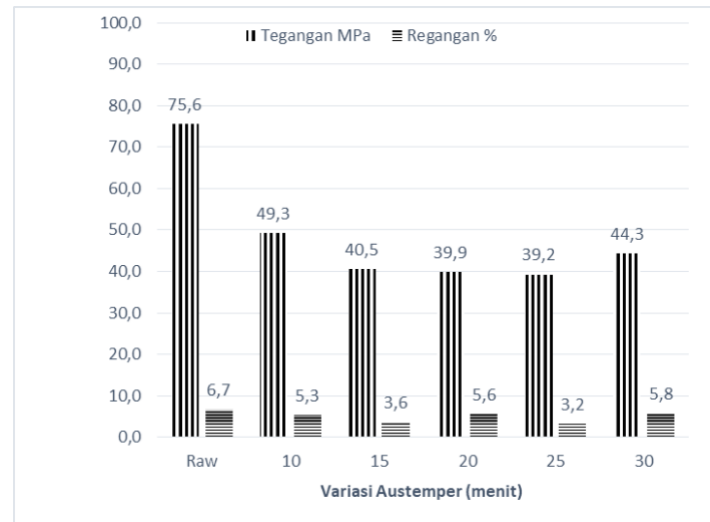
Pengujian kekerasan *Brinell* paduan Fe-1Al-6,9C menunjukkan bahwa proses austemper pada temperatur 900°C selama 1 jam dilanjut penahanan dalam garam cair temperatur 300°C meningkatkan nilai kekerasan hingga mencapai maksimum pada penahanan 30 menit dalam garam cair dengan nilai sebesar 407,44 Kg/mm². Hal ini disebabkan proses austemper mengubah struktur perlit menjadi bainit dimana nilai kekerasan bainit lebih tinggi dari ferit dan perlit [10].

3.4 Analisis Hasil Pengujian Tarik

Kekuatan tarik merupakan kemampuan material untuk menerima beban tarik tanpa mengalami kerusakan atau patah dan dinyatakan sebagai tegangan maksimum sebelum putus. Pada penelitian ini pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan alat *universal testing machine* dan standar spesimen menggunakan ASTM E8.

Tabel 3. Hasil pengujian tarik paduan Fe-1Al-6,9C

No.	Variasi Waktu Austemper	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Pmax (KN)	ΔL (mm)	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Rata-rata	
								σ (MPa)	ϵ (%)
1	Raw_1	2,73	4,12	0,99	1,88	88,02	7,52	75,6	6,68
2	Raw_2	2,82	4,21	0,75	1,46	63,17	5,84		
3	10 menit_1	2,89	4,39	0,45	1,23	35,47	4,92	49,3	5,32
4	10 menit_2	3,17	4,43	0,64	1,43	45,57	5,72		
5	15 menit_1	3,21	4,37	0,48	0,95	34,22	3,80	40,5	3,62
6	15 menit_2	3,38	4,41	0,66	0,86	44,28	3,44		
7	20 menit_1	2,98	4,40	0,58	1,38	44,23	5,52	39,9	5,62
8	20 menit_2	3,26	4,36	0,45	1,43	31,66	5,72		
9	25 menit_1	3,03	4,41	0,36	0,56	26,94	2,24	39,2	3,2
10	25 menit_2	2,85	4,46	0,60	1,04	47,20	4,16		
11	30 menit_1	3,22	4,57	0,66	1,63	44,85	6,52	44,3	5,82
12	30 menit_2	3,10	4,34	0,49	1,28	36,42	5,12		



Gambar 4. Diagram rata-rata pengujian tarik paduan Fe-1Al-6,9C

Tabel 3 dan Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian tegangan tarik dan regangan paduan Fe-1Al-6,9C pada spesimen *raw material* dan perlakuan panas austemper pada temperatur 900°C selama 1 jam dilanjutkan pencelupan dalam garam cair bertemperatur 300°C dengan variasi waktu 10, 15, 20, 25, dan 30 menit. Paduan ini memiliki nilai tegangan 75,6 MPa dan regangan 6,7%, hal ini disebabkan struktur yang adalah struktur ferit, perlit, dan grafit, dimana struktur perlit lebih dominan dan menyebar dibanding struktur lainnya, ukuran butir struktur ferit lebih tipis serta jarak struktur grafit lebih longgar. Selanjutnya hasil pengujian tegangan tarik dan regangan spesimen pada penahanan selama 10 menit dalam garam cair adalah 49,3 MPa dan regangan sebesar 5,3%, nilai ini turun signifikan sebesar 34,78% dan 20% dari nilai tegangan dan regangan *raw material*. Hal ini dikarenakan terjadinya pertumbuhan butir grafit yang jumlahnya lebih banyak dan lebih rapat dibanding spesimen *raw material*, serta terjadi pertumbuhan butir ferit, struktur perlit terlihat lebih sedikit dan sebagian besar berubah menjadi bainit. Pada penahanan selama 15 menit dalam garam cair hasil pengujian tegangan tarik adalah 40,5 MPa dan regangan sebesar 3,6%, nilai ini turun signifikan sebesar 17,8% dan 31,9% dari nilai penahanan selama 10 menit dalam garam cair, hal ini disebabkan pertumbuhan butir ferit yang semakin jelas dan besar serta kandungan C yang tinggi pada paduan ini menyebabkan matriks ferit bersifat *brittle*, struktur grafit lebih sedikit dan lebih longgar, serta struktur perlit yang hampir semua berubah menjadi struktur bainit yang menyebar dibawah batas butir. Pada penahanan selama 20 menit dalam garam cair hasil pengujian tegangan tarik adalah 39,9 MPa dan regangan sebesar 5,6%, nilai tegangan turun sebanyak 1,4% dari nilai penahanan selama 15 menit dalam garam cair, hal ini disebabkan pertumbuhan butir ferit sedikit membesar. Nilai regangan naik signifikan sebesar 55,2% dari nilai regangan penahanan selama 15 menit dalam garam cair, hal ini disebabkan pertumbuhan butir grafit lebih banyak dan lebih rapat, butir ferit membesar, serta struktur bainit terlihat lebih dominan dibanding struktur perlit.

Pada penahanan selama 25 menit dalam garam cair hasil pengujian tegangan tarik adalah 39,2 MPa dan regangan sebesar 3,2%, nilai tegangan turun sebesar 1,7% dari nilai penahanan selama 20 menit dalam garam cair, hal ini disebabkan butir ferit bertumbuh lebih besar dan lebih banyak. Nilai regangan turun signifikan sebesar 43 % dari nilai regangan penahanan selama 20 menit, hal ini disebabkan struktur grafit yang lebih rapat dan lebih banyak, butir ferit lebih besar dan dominan, dan struktur perlit yang hampir tidak terlihat, serta struktur bainit berkurang jumlahnya. Pada penahanan selama 30 menit dalam garam cair hasil pengujian tegangan tarik adalah 44,3 MPa dan regangan sebesar 5,8%, angka ini naik signifikan sebesar 13% dan 81,8% dari nilai tegangan dan regangan pada penahanan selama 25 menit dalam garam cair. Hal ini disebabkan berhentinya pertumbuhan butir ferit serta struktur bainit lebih banyak dibanding pada penahanan selama 25 menit dalam garam cair, struktur perlit hampir tidak terlihat dikarenakan menjadi struktur bainit, dan struktur grafit hanya sedikit lebih rapat.

Setelah proses austemper nilai tegangan dan regangan menurun hingga mencapai nilai terendah pada penahanan selama 25 menit dalam garam cair dengan nilai tegangan 39,2 MPa dan regangan 3,2%. Hal ini dikarenakan ukuran butir struktur grafit lebih banyak dan lebih rapat, ukuran butir struktur ferit semakin besar dan dominan, diketahui struktur ferit bersifat *Brittle* serta mempunyai *strength* rendah pada temperatur tinggi [15].

4. KESIMPULAN

- 1 Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa Fe-1Al-6,9C mengandung unsur utama besi (Fe) 89,40%, unsur paduan utama aluminium (Al) 0,98%, karbon (C) 6,94%, dan Silikon (Si) 1,69%.

- 2 Pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-1Al-6,9C terdiri dari struktur ferit, perlit, dan grafit. Perlakuan panas austemper pada temperatur 900°C selama 1 jam dilanjutkan pencelupan dalam garam cair pada temperatur 300°C menyebabkan struktur perlit berubah menjadi bainit, ukuran butir struktur ferit membesar dan dominan, serta jarak struktur grafit lebih rapat.
- 3 Pengujian kekerasan menggunakan metode pengujian *Brinell* menunjukkan bahwa perlakuan panas austemper pada temperatur 900°C selama 6,68% a 1 jam dilanjutkan pencelupan dalam garam cair pada temperatur 300°C meningkatkan kekerasan hingga mencapai maksimum pada penahanan selama 30 menit dalam garam cair sebesar 407,44 Kg/mm².
- 4 Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa paduan Fe-1Al-6,9C memiliki nilai tegangan sebesar 75,6 MPa dan nilai regangan sebesar 6,68%, proses austemper pada temperatur 900°C selama 1 jam dilanjutkan pencelupan dalam garam cair pada temperatur 300°C menurunkan nilai tegangan dan regangan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Prodi Teknik Mesin ITNY dan keluarga tercinta yang telah memberikan dukungan hingga terselesaikannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Andrijono, R.D., 2006, Pengaruh Kekerasan Terhadap Elongasi Dan Struktur Mikro Besi Tuang Nodular FCD 45 Hasil Proses *Austemper* 375°C, 425°C, *Transmisi Vol.2, No.2*, Hal. 193-202
- [2]. ASM H. Vol 11, 2002, *Failure Analysis and Prevention*, Materials Park, Ohio
- [3]. Bailey, W.D., Zimmer, J.M., 2006, Aluminium-Manganese-Iron Stainless Steel Alloy, *Patent Genius*, Vol.2, No. 034, Hal. 486
- [4]. Callister, W.D., David G. R., 2014, *Material Science and Engineering an Introduction*, Quad Graphics/Versailles, United States
- [5]. Dieter, 1996, *Metalurgi Mekanik*, Erlangga, Jakarta
- [6]. Frommeyer, 2000, Physical and Mechanical properties of Iron-Aluminium-(Mn-Si) Lightweight Steels, The 1999 ATS International Steelmaking Conference, Paris
- [7]. Huang, B.X., dkk., 2006, Mechanical Behavior and Martensitic Transformation of an Fe-Al-Si-Al-Nb Alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 438-440, No.5, Hal. 306-311
- [8]. Kartikasari, R., dkk., 2009, Pengaruh Temperatur Temper Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-1,26Al-1,05C, *Media Mesin*, Vol.10, No. 1, Hal. 22-29
- [9]. Qohar, A., dkk., 2020, Studi Pengaruh Temperatur Proses Austemper Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, Dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-5,2Al-0,6C, *Cendekia Mekanika*, Vol.01, No.01, Hal. 57-64
- [10]. Setyana, L.D., 2015, Studi Ukuran Grafit Besi Cor Kelabu Terhadap Laju Keausan Pada Produk Blok Rem Metalik Kereta Api, *Jurnal Material Teknologi Proses*, Vol.1, No.1, Hal. 16-21
- [11]. Setyo, N., Widodo, S., 2018, Peningkatan Sifat Mekanis Besi Cor Kelabu Melalui Proses Tempering, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.2, No.2, Hal. 1-10
- [12]. Shackelford, J.F., 1992, *Introduction to Material Science for Engineers*, 3th ed., McMillan Publishing Company, New York.
- [13]. Stefanescu., D.M., dkk., 1992, Modeling of Particle Distribution in Equiaxed-Grains Metal Matrix Composites, *Processing of Semi-Solid Alloys and Composites*, Vol. 79-80, No. 1, Hal. 406-416
- [14]. Surdia, T., Shinroku S., 1995, *Pengetahuan Bahan Teknik*, no. 3, Pradnya paramita, Jakarta
- [15]. Wang, C.J., Duh, J.G., 1988, Nitriding in The High Temperature Oxidation of Fe-31 Mn-9Al-6Cr Alloy, *Journal of Materials Science*, Vol. 23, No. 1, Hal. 769-775
- [16]. Widikda, A.P., 2020, *Teknologi Bahan*, Ahlimedia Press, Malang