

## Pengaruh Variasi *Holding Time* pada Proses *Single Stage Aging* Terhadap Kekerasan dan Mikrostruktur pada Material Paduan Al-Si-Cu-Fe

Apang Djafar Shieddieque<sup>1\*</sup>, Rendi Kuswandi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana Purwakarta  
Jalan Cikopak No 53 Mulyamekar Babakancikao Purwakarta Jawa Barat 41151

\*E-mail Korespondensi : [apang@wastukencana.ac.id](mailto:apang@wastukencana.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i1.26678>

Submitted July 21<sup>st</sup> 2024, Accepted March 4<sup>th</sup> 2025, Published April 7<sup>th</sup> 2025

### Abstrak

Paduan aluminium Al-Si-Cu merupakan paduan yang paling umum digunakan untuk peralatan rumah tangga, material pesawat terbang, otomotif, kapal laut, konstruksi dan lain-lain. Namun paduan aluminium hasil pengecoran masih memiliki sifat mekanis yang rendah sehingga diperlukan proses lain untuk meningkatkan kekuatannya. Salah satu proses penguatan aluminium adalah dengan cara memvariasikan komposisi dan/atau proses *heat treatment*. Tujuan Dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi waktu tahan aging terhadap struktur mikro dan kekerasan paduan Al-Si-Cu-Fe. Proses *heat treatment* yang dilakukan pada penelitian ini meliputi *solid solution treatment* (T=540°C dan t= 5 jam) dan variasi *Single stage aging* (T=155°C dan t= 4; 5; dan 6 jam). Pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanis dari paduan aluminium adalah pengamatan metalografi dan pengujian kekerasan *Brinell*. Pengamatan struktur mikro menunjukkan perubahan terhadap struktur mikro Silikon mulai dari sample *As cast* yang memiliki dendrit dan saat diberi perlakuan *aging* terlihat terbentuknya fasa AlSi dan AlFeSi. Semakin lama perlakuan aging, semakin besar dan tersebar butiran presipitat yang terbentuk. Pengaruh variasi *holding time* memberikan tingkat kekerasan yang berbeda dengan kekerasan tertinggi didapat pada proses *artificial aging* dengan *holding time* selama 4 jam dengan hasil 71,57 BHN. Namun bertambahnya waktu *holding time*, cenderung menurunkan kekerasan karena pertumbuhan fasa yang membesar.

**Kata Kunci:** *artificial aging, holding time, metalografi, pengujian kekerasan, solid solution treatment*

### Abstract

The Al-Si-Cu aluminum alloy is the most commonly used alloy for household appliances, aircraft materials, automotive, marine vessels, construction, and more. However, cast aluminum alloys still exhibit low mechanical properties, necessitating additional processes to enhance their strength. One method of strengthening aluminum is by varying the composition and/or heat treatment process. The aim of this research is to investigate the effect of aging time variation on the microstructure and hardness of the Al-Si-Cu-Fe alloy. The heat treatment processes conducted in this study include solid solution treatment (T=540°C and t=5 hours) and various single-stage aging treatments (T=155°C and t=4, 5, and 6 hours). Mechanical properties of the aluminum alloy were evaluated through metallographic observations and Brinell hardness testing. Microstructural observations indicate changes in the Silicon microstructure from the *As cast* sample, which exhibits dendrites, to the formation of AlSi and AlFeSi phases after aging treatment. With longer aging treatments, larger and more dispersed precipitate grains are formed. The variation in holding time has different effects on hardness, with the highest hardness obtained at a holding time of 4 hours during artificial aging, resulting in 71.57 BHN. However, increasing the holding time tends to decrease hardness due to the growth of larger precipitate phases.

**Key words:** *artificial aging, holding time, metallography, hardness testing, solid solution treatment*

## PENDAHULUAN

Aluminium (Al) merupakan unsur kimia golongan IIIA dalam sistem periodik unsur, dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gram per mol. Aluminium yang ringan mempunyai sifat tahan terhadap korosi dan hantaran listrik yang baik. Pemakaian aluminium diperkirakan masih terbuka luas baik sebagai material utama maupun material pendukung dengan ketersediaan biji aluminium di bumi yang melimpah. Menurut kementerian ESDM Pada tahun 2023 sumber daya bijih bauksit di Indonesia mencapai 6,6 miliar ton dengan cadangan mencapai 3,2 miliar ton. Di level global, Indonesia menempati posisi ke 6 terbsar di dunia pemasok bauksit. Data Kementerian ESDM menunjukkan produksi bauksit di Indonesia diperkirakan akan bertahan hingga tahun 2063 dengan tingkat produksi bauksit mencapai 70,3 juta ton per tahun.

Dimana bijih bauksit merupakan bahan dasar pembuatan aluminium dengan melalui proses Bayer (Mineral, 2021; Nurhidayat, 2017).

Dari berbagai jenis paduan aluminium, paduan aluminium Al-Si-Cu merupakan paduan yang paling umum digunakan dalam industri otomotif. Dalam beberapa tahun belakangan ini, penggunaan paduan aluminium tersebut meningkat, terutama di industri otomotif yang menggunakan *secondary aluminum* hasil *recycling* dalam bentuk berbagai komponen seperti *piston*, *cylinder head*, *wheel*, *load floor suspension*, *crank case* dan *manifold* (Shieddieque et al., 2020). Aluminium dapat dipergunakan untuk peralatan rumah tangga, material pesawat terbang, otomotif, kapal laut, konstruksi dan lain-lain (Ihsan, 2014; Surdia, 2004).

Produk-produk aluminium dihasilkan melalui proses pengecoran (*casting*) dan pembentukan (*forming*). Aluminium hasil pengecoran banyak dijumpai pada peralatan rumah tangga dan komponen otomotif misalnya *velg* (*cast wheel*), *piston*, blok mesin dan lain sebagainya. Aluminium hasil pembentukan diperoleh melalui tempa, rol dan ekstrusi misalnya aluminium profil dan plat yang banyak digunakan dalam konstruksi. Namun paduan aluminium hasil pengecoran masih memiliki sifat mekanis yang rendah sehingga diperlukan proses lain untuk meningkatkan kekuatannya. Salah satu proses penguatan aluminium adalah dengan cara memvariasikan komposisi dan/atau proses *heat treatment* (Elsebaie et al., 2014; Putra et al., 2020; Zulfia et al., 2010).

Sifat fisis dan mekanis suatu logam khususnya aluminium sangat penting untuk diketahui agar penggunaan logam tersebut sesuai dengan kebutuhan tanpa mengesampingkan sifat dan kondisi teknis dari logam tersebut (Setiadi et al., 2022). Masalah yang dihadapi dalam penggunaan logam aluminium adalah kebutuhan akan kekuatan mekanis yang memadai dan ketahanannya yang baik terhadap korosi (Yunus & Alamro, 2022). Seperti paduan aluminium untuk aplikasi tertentu, contohnya industri pesawat terbang, otomotif, dan konstruksi (Septian, 2022; Zhou et al., 2022). Namun, paduan aluminium seringkali memiliki sifat mekanis yang rendah, terutama setelah proses pengecoran. Oleh karena itu, diperlukan metode tambahan untuk meningkatkan kekuatan dan kinerja mekanis dari paduan aluminium (Liu et al., 2019).

*Heat treatment* merupakan salah satu metode penguatan yang cukup penting pada paduan aluminium, karena dengan tahapan yang tepat mampu meningkatkan beberapa sifat mekanik dari paduan (Vandersluis & Ravindran, 2020). Dua metode yang umum digunakan untuk meningkatkan kekuatan paduan aluminium adalah proses penguatan dengan menggunakan *Natural aging* dan *artificial aging* (Yang & Banhart, 2021). Proses ini melibatkan pemanasan paduan pada suhu tertentu untuk membentuk presipitasi yang menguatkan struktur paduan. Namun, pengaturan waktu dan suhu dalam proses *artificial aging* merupakan faktor kunci yang mempengaruhi efektivitasnya (Budiarto et al., 2020).

Dalam hal ini paduan aluminium akan diberikan *heat treatment* berupa *artificial aging*. *Artificial aging* yang merupakan salah satu mekanisme *precipitation hardening* (penguatan logam) (Paramartha, 2016). *Aging* bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis dan struktural paduan tersebut. Proses *aging* melibatkan pemanasan dan pendinginan tertentu setelah paduan telah melalui tahap perlakuan panas awal seperti pemanasan atau pendinginan cepat. Proses ini dapat menghasilkan perubahan mikrostruktur yang menguntungkan, seperti presipitasi partikel-partikel yang menguatkan dan memperbaiki sifat mekanis paduan. Sifat mekanis merupakan hal yang sangat penting diketahui pada suatu logam. Untuk mengetahui karakteristik suatu logam kita harus melakukan beberapa salah satunya pengujian metalografi dan pengujian kekerasan Brinell (Fallahi et al., 2014; Tash et al., 2007).

Terdapat beberapa faktor pada suatu paduan yang dapat mempengaruhi sifat mekanik antara lain: komposisi kimia, perlakuan panas (*heat treatment*), proses pengecoran dan proses pengerjaan (Pranata et al., 2018). Dengan mengubah komposisi kimia sampai batas tertentu, dan memberi perlakuan panas, maka sifat mekanik paduan akan menjadi lebih baik sesuai dengan yang diinginkan. Perlakuan panas (*heat treatment*) yang mencakup *solid solution treatment* dan *artificial aging*, pada paduan Al, Si, Cu, Fe bertujuan untuk merubah sifat pada paduan dan juga dapat meningkatkan kekerasan pada paduan tersebut.

Penelitian ini berfokus pada pengaruh *heat treatment* berupa variasi waktu *artificial aging* terhadap kekerasan dan struktur metalografi paduan. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh lingkungan ekstrem, seperti temperatur tinggi pada waktu yang lama, terhadap efektivitas proses *artificial aging* pada paduan aluminium, khususnya dalam aplikasi di industri otomotif. Meskipun proses *artificial aging* pada paduan aluminium sudah banyak diteliti, sebagian besar studi sebelumnya lebih fokus pada

kondisi temperatur dan waktu standar yang diterapkan pada lingkungan dengan kondisi moderat. Namun, dalam industri otomotif, material sering kali terpapar temperatur tinggi dalam waktu lama yang dapat mempengaruhi kinerja dan daya tahan paduan aluminium. Dalam waktu tersebut, dapat berdampak besar terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik paduan khususnya kekerasan.

## METODE PENELITIAN

### Tempat dan Waktu

Proses perlakuan panas, pengujian komposisi, pengujian kekerasan, dan pengamatan metalografi dilakukan di Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Logam dan Mesin Kementerian Perindustrian.

### Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini meliputi *solid solution treatment* dan *single stage aging* diantaranya:

#### A. Solid Solution Treatment:

Adapun tahapan yang dilakukan pada proses *Solid Solution* adalah pemansan tungku induksi sampai temperatur 540°C dan sampel dimasukkan kedalam tungku setelah temperatur tungku mencapai 540°C selama 5 jam. Setelah pemansan selama 5 jam, sampel dikeluarkan dari tungku dan dicelupkan ke dalam media pendingin air selama 10 detik.

#### B. Single Stage Aging:

Adapun tahapan *single stage aging* adalah mempersiapkan sampel yang telah melalui proses *Solid Solution Treatment*. Dengan memasukkan sampel tersebut kedalam tungku dengan temperatur 155°C selama 4, 5, dan 6 jam. Setelah selesai sampel dikeluarkan dan didinginkan pada temperatur kamar.

### Prosedur Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia dilakukan bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan unsur kimia yang terdapat pada paduan aluminium, pengujian yang berkaitan pada penelitian ini dilakukan di Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Logam dan Mesin Kementerian Perindustrian (BBSPJILM) menggunakan alat *optical emission spectroscopy ARUN technology* Tipe Polyspek-M No.Seri 7203 seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Uji komposisi inidilakukan melalui Pemotongan sampel aluminium sesuai dengan standar uji komposisi ARUN dengan ukuran diameter 25 mm yang telah dibersihkan melalui proses perlakuan permukaan agar terhindar dari *scaling*.



Gambar 1. Alat uji komposisi

Sampel yang digunakan merupakan sampel yang dibuat melalui proses pengecoran dengan komposisi seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Tabel komposisi paduan Al-Si-Cu-Fe

Unsur	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
Komposisi (%)	88,8	6,38	1,54	1,21	0,11	0,06	0,04	0,11	1,41

### Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah pengujian yang paling efektif untuk mengetahui ketahanan dari material terhadap deformasi plastis, pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan di BBSPJILM dengan menggunakan alat uji kekerasan merk Albert Gnehm Horgen (Gambar 2) tipe OM-150 dengan berat 150 kg. Adapun tahapan yang dilakukan pada pengujian kekerasan adalah dengan mempersiapkan sampel dan alat uji kekerasan, kemudian memilih metode pengujian yang cocok dengan sampel yang akan diuji (*Brinell*) dan memasang indenter berdiameter 2,5 mm. Pasang spesimen di atas meja uji pada mesin. Kemudian putar roda tangan untuk menaikkan meja uji sehingga spesimen mendekati indenter lalu atur beban sebesar 62,5 kg, Lakukan penekanan pengujian *Brinell* dan ukur lekukan yang terjadi di beberapa tempat dan posisi. Kemudian masukan data-data tersebut ke dalam rumus untuk mendapatkan hasil kekerasan material. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kekerasan *Brinell* ditunjukkan pada persamaan 1

$$BHN = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \dots \dots \dots (1)$$

dimana :

P = beban yang diberikan (Kg atau Kgf)

D = diameter indenter (mm),

d = diameter bekas lekukan (mm)



**Gambar 2.** Mesin Uji kekerasan *Brinell*

### Prosedur Uji Metalografi

Uji metalografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro dan fasa-fasa yang terbentuk sebelum dan sesudah dilakukannya proses *heat treatment* pada spesimen uji, pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan di BBLM (Balai Besar Logam Mesin) dengan menggunakan alat uji metalografi merk Olympus tipe bx53m dengan berat: 7,4 kg. Adapun tahapan yang dilakukan pada pengujian metalografi adalah sebagai berikut :

1. Pemotongan (*Cutting*) : pemotongan/proses pengambilan sampel yang akan dianalisis dengan menggunakan gergaji besi.
2. Pengamplasan (*Grinding*) : Sampel yang sudah dipotong kemudian dilakukan pengamplasan dengan No Grid P120 P220 P400 P800 P1000 P1500 P2000, yang bertujuan untuk meratakan permukaan sampel dengan kertas amplas kasar hingga halus, proses pengamplasan dilakukan pada kondisi basah untuk menghindari terjadinya gesekan yang mengakibatkan panas.
3. Pemolesan (*Polishing*) : Setelah dilakukan pengamplasan sampel dilanjutkan dengan pemolesan, dimana pemolesan bertujuan untuk menghaluskan serta menghilangkan goresan-goresan selama proses *grinding* dengan menggunakan kain bludru (*polishing cloth*) dan pasta diamond.
4. Pengetsaan (*Etching*) : Setelah sampel halus selanjutnya dilakukan pengetsaan pada sampel yang telah dilakukan pemolesan dengan menggunakan zat kimia yang bersifat asam atau basa, sehingga dapat memunculkan gambar struktur mikro dengan jelas. Untuk penelitian ini digunakan etsa HF 0,5% (Shieddieque, Tinggi, et al., 2021).
5. Pengamatan: Selanjutnya pengamatan yang dilakukan terhadap Struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan juga pemotretan untuk mendapatkan citra dari sampel yang diamati

## HASIL PEMBAHASAN

### Kode Sampel

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan data-data hasil pengujian komposisi kimia, kekerasan, impak dan struktur mikro yang kemudian diolah dalam bentuk gambar, tabel dan grafik. Dapat dilihat pada Tabel 2 menunjukkan kode sampel dan proses yang dilakukan.

**Tabel 2.** Kode sampel dan proses pada penelitian ini

Nama Sampel	As cast	A1	A2	A3
	Tanpa perlakuan	<i>Artificial Aging</i> Suhu 155 °C 4 jam	<i>Artificial Aging</i> Suhu 155 °C 5 jam	<i>Artificial Aging</i> Suhu 155 °C 6 jam
<b>Proses</b>				

### Nilai Kekerasan

Pada pengujian yang dilakukan, pengujian kekerasan menggunakan metode Brinell, hasil dari proses pengujian kekerasan dapat dilihat pada Tabel 3 sampai dengan Tabel 6.

**Tabel 3.** Data hasil pengujian kekerasan Sample As-Cast

Titik	d1 (mm)	d2 (mm)	d rata rata (mm)	Kekerasan (BHN)
Titik 1	1,087	1,068	1,0775	65,22
Titik 2	1,056	1,043	1,0495	68,94
Titik 3	1,044	1,032	1,038	70,55
				Rataan = 68,24

**Tabel 4.** Data hasil pengujian kekerasan Sampel A1

Titik	d1 (mm)	d2 (mm)	d rata rata (mm)	Kekerasan (BHN)
Titik 1	1,044	1,028	1,036	70,85
Titik 2	1,021	1,042	1,0315	71,50
Titik 3	1,021	1,03	1,0255	72,38
				Rataan = 71,57

**Tabel 5.** Data hasil pengujian kekerasan Sampel A2

Titik	d1 (mm)	d2 (mm)	d rata rata (mm)	Kekerasan (BHN)
Titik 1	1,056	1,053	1,0545	68,26
Titik 2	1,023	1,023	1,023	72,75
Titik 3	1,06	1,055	1,0575	67,85
				Rataan = 69,62

**Tabel 6.** Data hasil pengujian kekerasan Sampel A3

Titik	d1 (mm)	d2 (mm)	d rata rata (mm)	Kekerasan (BHN)
Titik 1	1,046	1,042	1,044	69,71
Titik 2	1,081	1,074	1,0775	65,23
Titik 3	1,07	1,049	1,0595	67,58
				Rataan =67,50

Dengan menggunakan persamaan 1 maka didapatkan hasil dari pengujian kekerasan berupa *Brinell Hardness Number* (BHN) yang terdapat pada Tabel 6. Pada sampel *As-cast*, yg mewakili paduan aluminium yg hanya melalui proses pengecoran tanpa perlakuan lanjutan, nilai rata-rata kekerasan tercatat sebanyak 68,24 BHN. Kekerasan dalam syarat pengecoran ini mencerminkan sifat material yg belum mengalami pengolahan lebih lanjut, mikrostruktur paduan aluminium pada tahap ini terdiri atas butiran kasar dan fase paduan yg belum optimal pada hal penguatan sifat mekanik. Oleh karena itu, nilai kekerasan dalam *as-cast* lebih rendah dibandingkan menggunakan sampel yg menjalani proses perlakuan termal misalnya *Artificial Aging*. Pada sampel A1, yg sudah menjalani proses *Artificial Aging* selama 4 jam, nilai homogen-homogen kekerasan tercatat sebanyak 71,57 BHN. Proses *Artificial Aging* bertujuan buat menaikkan kekerasan paduan aluminium menggunakan mengendalikan pembentukan presipitat yg memperkuat matriks aluminium. Proses ini melibatkan pemanasan dalam suhu eksklusif diikuti menggunakan pendinginan cepat (*quenching*). Durasi perlakuan 4 jam ini terbukti relatif efektif buat menaikkan kekerasan paduan aluminium dibandingkan menggunakan syarat pengecoran, memperlihatkan bahwa proses presipitasi berfungsi menggunakan baik dalam rentang ketika ini. Pada sampel A2, yg sudah menjalani proses *Artificial Aging* selama lima jam, nilai rata-rata kekerasan tercatat sebanyak 69,62 BHN. Meskipun mengalami peningkatan kekerasan dibandingkan menggunakan sampel *As-cast*, kekerasannya lebih rendah dibandingkan menggunakan sampel A1 (4 jam). Hal ini memperlihatkan bahwa penambahan ketika perlakuan menurut 4 jam sebagai lima jam nir menaruh peningkatan kekerasan yg signifikan, bahkan mungkin menandakan bahwa proses penguatan melalui presipitasi telah mendekati titik jenuhnya.

**Tabel 7.** Data hasil pengujian kekerasan (BHN)

Sampel	Proses	Rata-Rata
<i>As-cast</i>	Pengecoran	68,24
A1	<i>Artificial Aging</i> 4 jam	71,57
A2	<i>Artificial Aging</i> 5 jam	69,62
A3	<i>Artificial Aging</i> 6 jam	67,50

Terlalu usang pada proses aging bisa mengakibatkan pengendapan fase optimal atau malah pengendapan yg terlalu banyak, sebagai akibatnya justru bisa mereduksi kekerasan. Pada sampel A3, yg menjalani *Artificial Aging* selama 6 jam, nilai homogen-homogen kekerasannya tercatat sebanyak 67,50 BHN, yg adalah nilai terendah pada antara seluruh sampel yg diuji. Hal ini memperlihatkan bahwa durasi 6 jam pada proses aging justru menurunkan kekerasan dibandingkan menggunakan sampel A1 (4 jam). Pengaruh ini bisa ditimbulkan sang pengaruh over-aging, pada mana presipitat yg terbentuk dalam paduan aluminium bisa mengalami *coarsening* (pemuaihan) sehabis ketika eksklusif. *Coarsening presipitat* mengurangi kemampuan material buat mengunci dislokasi, sebagai akibatnya menurunkan kekerasan material. Hal ini sejalan dengan penelitian Budiarto, yang menunjukkan semakin lama waktu tahan Aging, maka nilai kekerasan paduan semakin menurun (Budiarto *et al.*, 2020). Data tersebut dilakukan pengolahan kembali untuk meninjau seberapa jauh perbedaan antar variable melalui metode ANOVA *single factor* seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

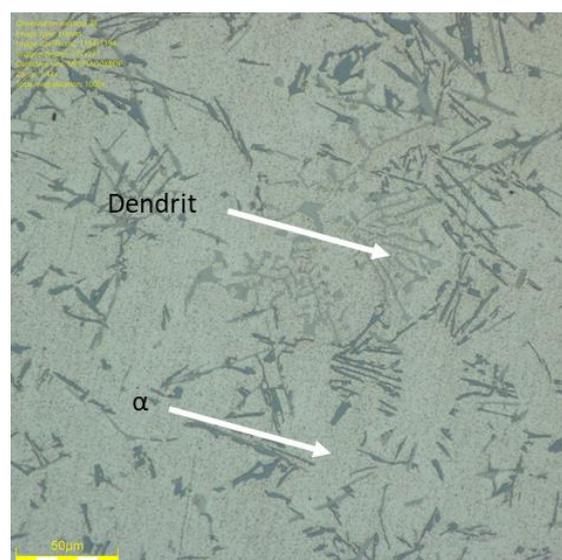
**Tabel 8.** Analisis ANOVA untuk data hasil pengujian kekerasan paduan aluminium dengan perbedaan waktu tahanan *Artificial Aging*

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat (SS)	Derajat Kebebasan (df)	Mean Kuadrat (MS)	F-statistik
<b>Antar Kelompok (SSB)</b>	38,39	3	12,79	3,74
<b>Dalam Kelompok (SSW)</b>	40,95	12	3,41	
<b>Total (SST)</b>	79,34	15		

Dari Tabel 8 ditemukan bahwa nilai Rasio antara MS antar kelompok (MSB) dan MS dalam kelompok (MSW) yaitu nilai F Statistik adalah sebesar 3,74, yang digunakan untuk menguji signifikansi, dengan nilai F kritis yang digunakan berada pada tingkat signifikansi  $\alpha = 0.05$ . F kritis dapat dicari dengan menggunakan tabel distribusi F, dengan derajat kebebasan df1 untuk antar kelompok dan df2 untuk dalam kelompok, nilai F kritis kira-kira adalah 3,49 (Junaidi, 2010). Karena F-statistik (3,749851) > F kritis (3,49), maka kita menolak hipotesis nol ( $H_0$ ), yang menyatakan bahwa tidak ada perbedaan rata-rata antar kelompok namun terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok yang diuji.

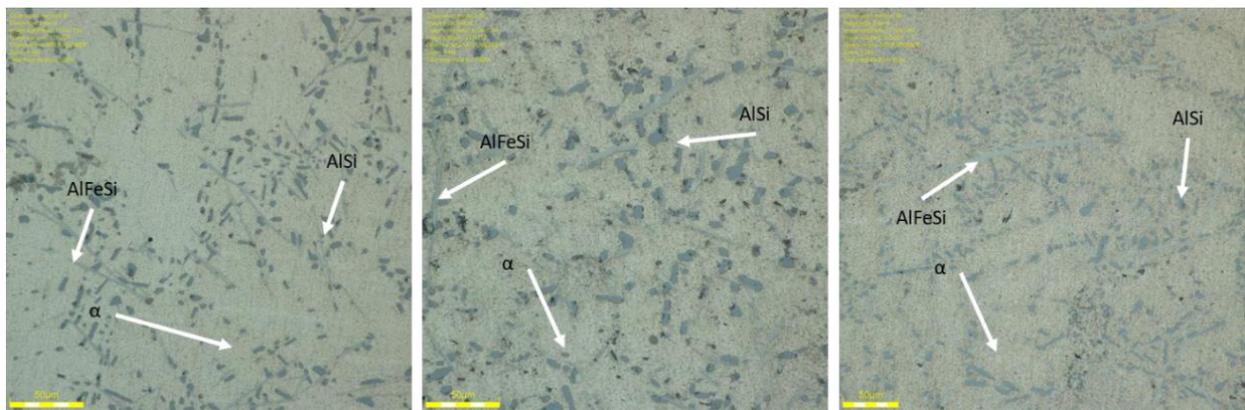
### Pengamatan Metalografi

Dari Gambar 3 yaitu sampel standar terlihat bahwa kondisi awal (tanpa proses *heat treatment*), fasa yang terbentuk adalah fasa  $\alpha$  (Al) yaitu bagian yang berwarna putih dan dendrit yang membentuk seperti ranting. Pada kondisi awal, presipitat belum terlihat karena belum adanya proses pengendapan dari unsur pepadu. Dendrit pada aluminium terbentuk karena proses pembekuan atau pendinginan dari keadaan cair ke padat. Dendrit adalah struktur cabang-cabang halus yang terbentuk dalam struktur mikro kristal logam saat proses solidifikasi. Fenomena ini terjadi ketika cairan logam mulai mendingin dan mengalami transisi dari fase cair menjadi fase padat. Dendrit terbentuk karena perbedaan laju pendinginan yang terjadi dalam struktur solidifikasi logam. Pada saat pendinginan dimulai, beberapa bagian dari logam mendingin lebih cepat daripada yang lainnya karena kontak langsung dengan permukaan pendingin atau dinding cetakan. Ini menciptakan perbedaan suhu dalam cairan logam. Pembentukan dendrit pada aluminium dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti laju pendinginan, komposisi paduan, dan adanya pengotor, selain itu morfologi struktur pada paduan ditentukan oleh gradien temperatur dan laju pendinginan dari lelehan (Yang *et al.*, 2023). Terbentuknya dendrit dapat mempengaruhi sifat mekanik aluminium, seperti kekuatan dan keuletannya. Kehadiran silikon dalam paduan aluminium dapat mempengaruhi pembentukan dendrit. Penambahan silikon dapat mendorong pembentukan dendrit pada paduan aluminium-silikon (Rahmawati, 2010; Widyatmoko *et al.*, 2019).



**Gambar 3.** Hasil pengamatan mikrostruktur sampel as-cast

Pada variasi temperatur *aging* 155 °C dengan variasi *holding time* selama 4-6 jam yang ditunjukkan pada 4 terlihat presipitat telah mengalami *nukleasi* (Pengintian) dan struktur mikro dengan presipitat yang menyebar lebih merata serta hilangnya dendrit pada permukaan yang diamati. Presipitat yang terbentuk mengalami perubahan dari ukuran kecil dan terpisah jauh hingga berukuran besar dan mengkluster karena semakin banyaknya fasa presipitasi yang tumbuh. Semakin lama waktu holding presipitat yang terbentuk cenderung lebih besar (Shieddieque, Virdhian, et al., 2021). Hal ini terjadi karena presipitat terus terbentuk pada temperatur *aging*. Presipitat tersebut relatif terbentuk pada suhu *aging* 155 °C, sehingga mampu mengubah nilai sifat mekanik (terutama kekerasan). Pada ketiga mikrostruktur, terlihat fasa baru yaitu AlSi yang strukturnya membulat. Fasa AlSi muncul pada paduan aluminium selama proses perlakuan panas pada suhu yang lebih tinggi karena proses pengerasan presipitasi. Selama proses ini, mekanisme penguatan yang bekerja pada suhu kamar mengubah keefektifan dan kontribusinya, yang mengarah pada pembentukan fase AlSi (*ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams - ASM International, 2004*). Selain itu terdapat juga penyebaran AlFeSi yang terbentuk. Fasa AlFeSi merupakan fasa intermetalik yang dapat terbentuk pada paduan aluminium yang mengandung besi dan silikon, karena Besi adalah unsur pengotor yang umum dalam paduan aluminium, dan merupakan sumber Fe dalam AlFeSi. Fase intermetalik AlFeSi dapat memiliki efek menguntungkan dan merugikan pada sifat mekanik paduan aluminium (Muttahar et al., 2020b; Shieddieque, Virdhian, dkk., 2021). Disebut menguntungkan karena dapat menambah kekerasan paduan namun fasa  $\beta$ -AlFeSi memiliki morfologi pipih juga adalah fasa yang tidak diinginkan dan dapat mengurangi keuletan dan kekuatan tarik paduan karena fasa ini memiliki ikatan yang lemah dengan matriks aluminium (Muttahar, 2019).



**Gambar 4.** Hasil pengamatan mikrostruktur sampel (kiri) SSA dengan *Holding time* 4 jam (tengah) SSA dengan *Holding time* 5 jam (kanan) SSA dengan *Holding time* 6 jam

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Pada hasil pengamatan struktur mikro didapat perubahan terhadap struktur mikro Si mulai dari sample *As cast* yang memiliki dendrit serta hingga diberi perlakuan aging terlihat terbentuknya fasa AlSi dan AlFeSi dengan perbedaan dari morfologinya karena perbedaan waktu tahan aging. Semakin lama perlakuan aging, semakin besar dan tersebar butiran presipitat yang terbentuk. Pada pengaruh variasi holding time didapatkan perbedaan tingkat kekerasan berbeda, tingkat kekerasan tertinggi didapat pada proses artificial aging dengan holding time selama 4 jam dengan hasil 71,57 BHN. Namun seiring bertambahnya waktu holding time, semakin menurunnya kekerasan karena pertumbuhan fasa yang membesar dan meluasnya matriks. Untuk penelitian lanjutan disarankan dilakukan pengujian selanjutnya dengan metode yang lain (uji impak) agar mendapatkan data maksimal terhadap variasi holding time pada bahan Al-Si-Cu-Fe Penelitian ini dapat diajukan sebagai referensi dalam melakukan penelitian dengan variasi temperature pada *artificial aging* aluminium.

## DAFTAR PUSTAKA

*ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams - ASM International (Vol. 7)*. (2004). ASM Internasional. [https://www.asminternational.org/search/-/journal\\_content/56/10192/25871543/publication](https://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/publication)

- Budiarto, B., Antonius, D., & Putra, B. A. (2020). Analisis Pengaruh Waktu Artificial Age Terhadap Kekerasan, Densitas Dan Struktur Kristal Paduan Aluminium (7075) Untuk Bahan Sirip Roket. *Jurnal Kajian Ilmiah*, 20(1), 13–28. <https://doi.org/10.31599/jki.v20i1.67>
- Elsebaie, O., Samuel, A. M., Samuel, F. H., & Doty, H. W. (2014). Impact toughness of Al-Si-Cu-Mg-Fe cast alloys: Effects of minor additives and aging conditions. *Materials and Design*, 60, 496–509. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.031>
- Fallahi, A., Hosseini-Tudeshky, H., & Ghalehbandi, S. M. (2014). Effect of heat treatment on mechanical properties of ECAPed 7075 aluminum alloy. *Advanced Materials Research*, 829(January 2017), 62–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.829.62>
- Liu, Y., Pan, Q., Li, H., Huang, Z., Ye, J., & Li, M. (2019). Revealing the evolution of microstructure, mechanical property and corrosion behavior of 7A46 aluminum alloy with different ageing treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.324>
- Mineral, K. E. dan S. D. (2021). *Panduan Evaluasi Sistem Pengolahan Aluminium*. 1–37. [www.ebtke.esdm.go.id](http://www.ebtke.esdm.go.id)
- Muttahar, M. I. Z. (2019). *Pengaruh Variasi Waktu Holding Proses Artificial Aging Terhadap Kekuatan Tarik Dan Ketahanan Impak Paduan Al-Si Effect Of Holding Time During Artificial Aging Of Al-Si Alloy*. 41, 69–74.
- Muttahar, M. I. Z., Virdhian, S., Putra, P. A., Djuanda, D. R., Afrilinda, E., & Genesar, A. (2020). *Mechanical Properties Enhancement Of Al-Si-Cu-Fe Alloy Through Aging Treatment Variations*. 24(1), 67–84.
- Nurhidayat, M. (2017). Pengaruh Arus dan Waktu Anodisasi Terhadap Kekerasan Pada Lapisan Oksida Aluminium. *Jurnal Teknik Mesin*.
- Paramartha, I. G. B. (2016). Studi Eksperimental Pengaruh Perlakuan Panas Precipitation Hardening T6 Dengan Variasi Holding Time Dan Temperatur Solution Treatment Terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium Adc 12 Experimental Study on the Effect of Precipitation Hardening T6 Paired With. *Tugas Akhir– Tm141585*. [https://repository.its.ac.id/1184/1/2111100046-Undergraduate\\_Theses.pdf](https://repository.its.ac.id/1184/1/2111100046-Undergraduate_Theses.pdf)
- Perwakilan, D., & Republik, R. (2022). *Miliki Cadangan Bauksit Terbesar di Dunia , Legislator Sayangkan Indonesia Impor Aluminium*. 2–3.
- Pranata, M. D. E., Alfirano, & Mujiat, J. (2018). Analisis Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Paduan Al 2014 Hasil Proses Aging Dengan Variasi Temperatur Dan Waktu Tahan. *Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa*, 1(1), 1–9.
- Putra, P. A., Krisnadi, L., Muttahar, M. I. Z., Abdullah, H., & Amalia, D. (2020). Pengembangan Boogie Wheel Tank AMX-13 untuk Komponen Kendaraan Tempur Tank Jenis Ringan. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 10(2), 100–109. <https://doi.org/10.37209/jtbbt.v10i2.186>
- Rahmawati, Z. S. (2010). *Pengaruh Putaran Terhadap Kekuatan Tarik Pada Friction Welding Aa 2024 –T3 Dengan Aa 6061 –T6*. 5–20. [https://lib.ui.ac.id/file?file=digital/132994-T\\_27820-Analisis\\_pengaruh-Tinjauan\\_literatur.pdf](https://lib.ui.ac.id/file?file=digital/132994-T_27820-Analisis_pengaruh-Tinjauan_literatur.pdf)
- Septian, M. F. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Artificial Aging Pada Aluminium 6061 Terhadap Sifat Kekerasan the Effect of Artificial Aging Temperature Variations on Aluminum 6061 on Hardness and Micro Structure. *Universitas Lampung*.
- Setiadi, B., Martupa, L., Lumban, D., Moh, J., li, K., Sawah, S., & Selatan, J. (2022). Analisa Sifat Mekanis Velg Aluminium Sepeda Motor Menggunakan Metode Heat Treatment Dengan Variasi Waktu Kelipatan 3 Jam Pada Suhu Aging 150°C. *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi*, 32(Vol. 32 No. 4 (Desember 2022)), 64–73. <https://doi.org/10.37277/stch.v32i4.1474>
- Shieddieque, A. D., Suratman, R., & Widyanto, B. (2020). *Effect of Alkaline Treatment and Fiber Orientation on Mechanical Properties of Biocomposite Sansevieria trifasciata Fibre / Vinyl Ester*. 62(05), 2631–2637.

- Shieddieque, A. D., Tinggi, S., Wastukencana, T., Virdhian, S., Industries, M., Jatira, J., Tinggi, S., & Wastukencana, T. (2021). *Effect of non-isothermal aging on microstructure and impact toughness of Al – Si – Cu – Fe cast alloy*. November. <https://doi.org/10.1063/5.0066662>
- Shieddieque, A. D., Virdhian, S., Muttahar, M. I. Z., Jatira, Akbar, M. R., & Kanestu, G. D. (2021). Effect of non-isothermal aging on microstructure and impact toughness of Al-Si-Cu-Fe cast alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2338. <https://doi.org/10.1063/5.0066662>
- Surdia, T. (2004). *Klasifikasi Paduan Aluminium*.
- Tash, M., Samuel, F. H., Mucciardi, F., & Doty, H. W. (2007). Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A*, 443(1–2), 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.054>
- Vandersluis, E., & Ravindran, C. (2020). Effects of solution heat treatment time on the as-quenched microstructure, hardness and electrical conductivity of B319 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 838, 155577. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155577>
- Yang, J., Ni, Y., Li, H., Fang, X., & Lu, B. (2023). Heat Treatment Optimization of 2219 Aluminum Alloy Fabricated by Wire-Arc Additive Manufacturing. *Coatings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/coatings13030610>
- Yang, Z., & Banhart, J. (2021). Natural and artificial ageing in aluminium alloys – the role of excess vacancies. *Acta Materialia*, 215, 117014. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117014>
- Yunus, M., & Alamro, T. (2022). Evaluation of wear and corrosion properties of FSWed aluminum alloy plates of AA2020-T4 with heat treatment under different aging periods. *Reviews on Advanced Materials Science*, 61(1), 687–697. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0261>
- Zhou, J., Miao, J., Wang, B., & Wang, J. (2022). Effect of Solution Treatment and Aging Treatment on Mechanical Properties of 2060 Al-Li Alloy and Process Multi-Objective Optimization. *Metals*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/met12060897>
- Zulfia, A., Juwita, R., Uliana, A., Jujur, I. N., & Raharjo, J. (2010). Proses Penuaan (Aging) pada Paduan Aluminium AA 333 Hasil Proses Sand Casting. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 13–20. <https://doi.org/10.9744/jtm.12.1.13-20>