



## Analisis Sifat Mekanik dan Sifat Fisik Paduan Aluminium pada Perlakuan Penuaan Buatan

D.I. Tsamroh<sup>a,\*</sup>, M. I. N. Sasongko<sup>b</sup>, C. Yazirin<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang, Jl. Terusan Raya Dieng 62-64 Malang, Indonesia

<sup>b</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang, Jl. Borobudur No. 35 Malang, Indonesia

<sup>c</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang, Jl. Mayjen Haryono 193 Malang, Indonesia

\*Corresponding author email: [izza@unmer.ac.id](mailto:izza@unmer.ac.id)

### INFORMASI ARTIKEL

Diterima: 02 Februari 2022

Direvisi: 28 Februari 2022

Disetujui: 10 Maret 2022

Tersedia online: 15 Maret 2022

### ABSTRACT

The most widely used aluminum alloy in industry is Al2024 alloy. Aluminum alloys used for automotive components are required to have good strength. The purpose of this study was to analyze the distribution of precipitates, morphology and hardness of Al2024 alloy due to artificial aging in stages I, II, and III. The test results showed that the highest distribution of precipitates (CuAl<sub>2</sub>) was in Al2024 with the third-stage artificial aging variation, and the least distribution was in the I-stage artificial aging variation. The results of morphological observations on Al2024 due to multilevel artificial aging treatment using SEM, the microstructure of Al2024 was relatively the same. (homogeneous) at each level variation. The stratified artificial aging treatment on Al2024 causes the particle size at each level variation to be smaller with closer distances. Meanwhile, the hardness value of Al2024 increased. The highest hardness of Al2024 is in the specimen with the third stage of artificial aging treatment, which is 79.66 HRE, the lowest hardness is the first stage of artificial aging, which is 74.33 HRE.

*Keywords: Artificial Aging in Stages, Aluminum Alloy, Microstructure, Morphology, Hardness*

### ABSTRAK

Paduan aluminium yang banyak digunakan pada industri merupakan paduan Al2024. Paduan aluminium yang digunakan untuk komponen otomotif dituntut memiliki kekuatan yang baik. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis persebaran presipitat, morfologi serta kekerasan paduan Al2024 akibat penuaan buatan bertingkat I, II, dan III. Hasil pengujian menunjukkan bahwa persebaran presipitat (CuAl<sub>2</sub>) terbanyak pada Al2024 dengan variasi penuaan buatan bertingkat III, dan persebaran paling sedikit pada variasi penuaan buatan bertingkat I. Hasil pengamatan morfologi pada Al2024 akibat perlakuan penuaan buatan bertingkat dengan menggunakan SEM, struktur mikro pada Al2024 relatif sama (homogen) pada setiap variasi tingkat-nya. Perlakuan penuaan buatan bertingkat pada Al2024 menyebabkan ukuran partikel pada setiap variasi tingkat-nya menjadi lebih kecil dengan jarak yang dekat. Sedangkan nilai kekerasan Al2024 meningkat. Kekerasan Al2024 paling tinggi adalah pada spesimen dengan perlakuan penuaan buatan bertingkat III yaitu 79.66 HRE, kekerasan terendah adalah penuaan buatan bertingkat I yaitu 74.33 HRE.

DOI: 10.26905/jtmt.v18i1.8056

Kata Kunci: Penuaan Buatan Bertingkat, Paduan Aluminium, Struktur Mikro, Morfologi, Kekerasan

## 1. Pendahuluan

Dalam dunia industri penggunaan material logam mengalami peningkatan yang sangat pesat. Penggunaan bahan logam non besi seperti paduan aluminium dengan karakteristik yang spesifik memiliki strength to weight ratio (kekuatan/berat jenis) yang tinggi dan tahan terhadap pengaruh lingkungan sangat banyak ditemukan dan digunakan dalam industri pesawat terbang. Penggunaan aluminium pada

industri otomotif terus meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah kendaraan yang ada di Indonesia sejak tahun 1980. Terdapat banyak komponen otomotif yang terbuat dari paduan aluminium, diantaranya adalah piston, blok mesin, cylinder head, valve, dan lain sebagainya [1].

Penggunaan paduan aluminium untuk memenuhi kebutuhan industri dikarenakan material ini memiliki karakter yang sesuai untuk dijadikan bahan. Menurut Puspitasari

(2105) umumnya aluminium dipilih sebagai bahan karena material ini ringan, relatif murah dan mudah difabrikasi. Akan tetapi, material ini memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan material lainnya seperti besi tuang, baja maupun tembaga [2]. Sedangkan dalam dunia industri, penggunaan paduan aluminium untuk komponen otomotif dituntut memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik [3]. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk memperbaiki sifat mekanis suatu material agar memenuhi standar kualitas yang baik sebagai bahan baku yang digunakan dalam dunia industry [4].

Sifat mekanis suatu material dapat diperbaiki atau ditingkatkan dengan beberapa cara. Puspitasari (2015) menjelaskan bahwa aluminium dapat ditingkatkan kekuatannya melalui proses pemaduan (alloying), proses pengerjaan dingin (cold working) dan perlakuan panas (heat treatment) dengan proses penuaan (aging) [5]. Terdapat banyak paduan aluminium yang digunakan dalam industri otomotif, akan tetapi paduan yang sering digunakan adalah duralumin yang sering disebut dengan duralium. Duralium merupakan paduan antara aluminium dan tembaga yang memiliki sifat ringan, keuletan yang tinggi serta tahan korosi. Paduan ini dinamakan duralumin dikarenakan memiliki sifat durability yang tinggi. Durability merupakan kemampuan suatu material untuk menerima beban kejut sehingga mampu memperpanjang usia produk akibat fatigue [6].

Menurut Merica (1919: 272) menyatakan bahwa komponen dari paduan duralium biasanya terdiri dari Cu 3%-4,5%; Mg 0,4 %- 1%; mangan 0% - 0,7%; jumlah al menyesuaikan komposisi; Ir 0,4% - 1%; Si 0,3% - 0,6%. Paduan ini digunakan dalam bidang yang luas bukan hanya untuk peralatan rumah tangga saja tetapi juga dipakai untuk kepentingan industri, misalnya untuk industri pesawat terbang, komponen-komponen mobil, komponen regulator dan konstruksi konstruksi yang lain [7].

Kekerasan duralium dapat ditingkatkan melalui proses artificial aging dengan media pendingin campuran dromus oil dan air. Hal ini dilakukan untuk merubah struktur mikro pada duralium sehingga dapat memperbaiki sifat mekanis duralium. Biasanya proses ini dilakukan setelah proses solution heat treatment dan quenching, kemudian hardening dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu pada temperatur kamar (natural aging) atau dengan perlakuan panas presipitasi (artificial aging) [8].

Artificial aging merupakan proses dimana paduan logam dipanaskan pada suhu tertentu yang kemudian ditahan dalam waktu tertentu. Dalam proses ini presipitat muncul dan tersebar merata dan membentuk kelompok-kelompok, pada

tahap ini dapat dihasilkan efek penguatan material yang optimum. Identifikasi dan analisis perubahan fasa ini dilakukan dengan beberapa uji untuk mengetahui struktur mikro pada duralium. Sedangkan multistage artificial aging merupakan proses artificial aging dimana proses penahanan dilakukan dengan beberapa kali siklus [9].

Penuaan pada suhu kamar akan memakan waktu yang lebih lama, biasanya sekitar 96 jam untuk mencapai kekuatan yang lebih stabil, sedangkan apabila penuaan dilakukan secara artificial, maka lamanya penuaan bergantung pada temperatur pemanasan. Penuaan buatan (artificial aging) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang diberi perlakuan age hardening dalam keadaan panas. Artificial aging berlangsung pada temperatur antara 100 °C - 200 °C dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam [10].

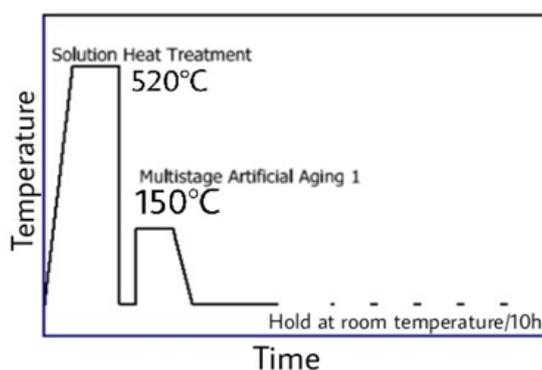
Fokus penelitian ini adalah mengetahui struktur mikro dan kekerasan pada duralium akibat proses multistage artificial aging dengan variasi stage I, II, dan III.

## 2. Metode Penelitian

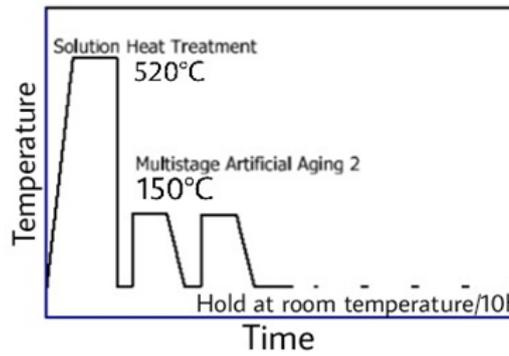
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif dituntut untuk menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran atas data tersebut, serta penampilan dari hasilnya. Sedangkan jenis metode penelitian yang digunakan, jenis penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian eksperimen, yang menggunakan model penelitian the one-shot case study. kelompok (X) dalam pengujian tertentu yang kemudian di lanjutkan dengan observasi /pengukuran (O) [11].

Instrumen penelitian dalam penelitian ini adalah Optical Microscope yang digunakan untuk memperoleh data persebaran presipitat pada diuralium, pengamatan morfologi duralium menggunakan Scanning Electron Microscope Merk FEI Type Inspect S50. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah stage pada multistage artificial aging yaitu stage I, II, dan III. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah struktur mikro yang meliputi persebaran presipitat dan morfologi duralium dan kekerasan. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah suhu hardening, media pendingin, dan suhu artificial aging.

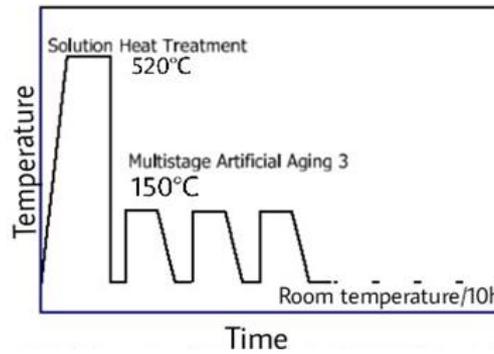
Tahap pertama dalam penelitian ini adalah menyiapkan spesimen uji sebanyak 4 buah, 3 spesimen untuk masing-masing variabel bebas dan 1 spesimen sebagai raw specimen. Selanjutnya menyiapkan media pendingin yang terdiri dari media pendingin air, dan campuran dromus oil dengan perbandingan 4 : 1.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 1.** Diagram perlakuan penuaan buatan bertingkat (a) tingkat I; (b) tingkat II, dan (c) tingkat III.

Tahap selanjutnya adalah proses pemanasan duralium hingga suhu 520 °C dan ditahan selama 30 menit dilanjutkan dengan pendinginan cepat dengan media pendingin yang telah disiapkan. Setelah duralium mencapai suhu kamar, duralium dipanaskan kembali hingga suhu 150 °C dan ditahan selama 2 jam dan didinginkan di dalam dapur pemanas (stage 1). Selanjutnya untuk stage 2, setelah spesimen mendapatkan perlakuan solution heat treatment, maka dilakukan dua kali pemanasan dan penahanan pada suhu 150 °C selama 2 jam. dan kemudian didinginkan di dalam dapur pemanas. Stage 3, setelah spesimen mendapatkan perlakuan solution heat treatment, maka dilakukan tiga kali pemanasan dan penahanan pada suhu 150 °C selama 2 jam. dan kemudian didinginkan di dalam dapur pemanas.

Setelah spesimen mencapai suhu ruang, dilakukan pengujian struktur mikro yang menggunakan *Optical Microscope* dan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Tahap

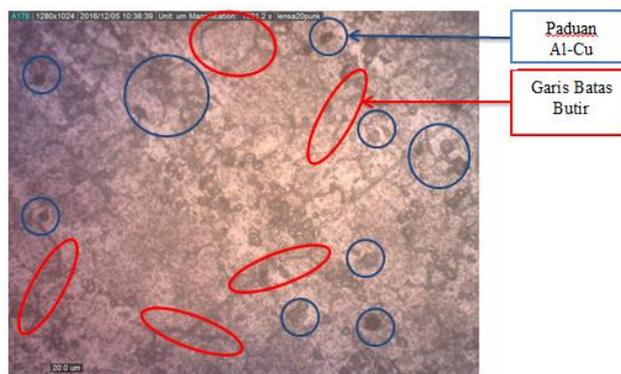
selanjutnya dalam penelitian ini adalah pengujian kekerasan dengan mesin pengujian kekerasan *Torse Motorized Rockwell System Hardness Tester* (Type RH-3NR-A).

### 3. Hasil dan Pembahasan

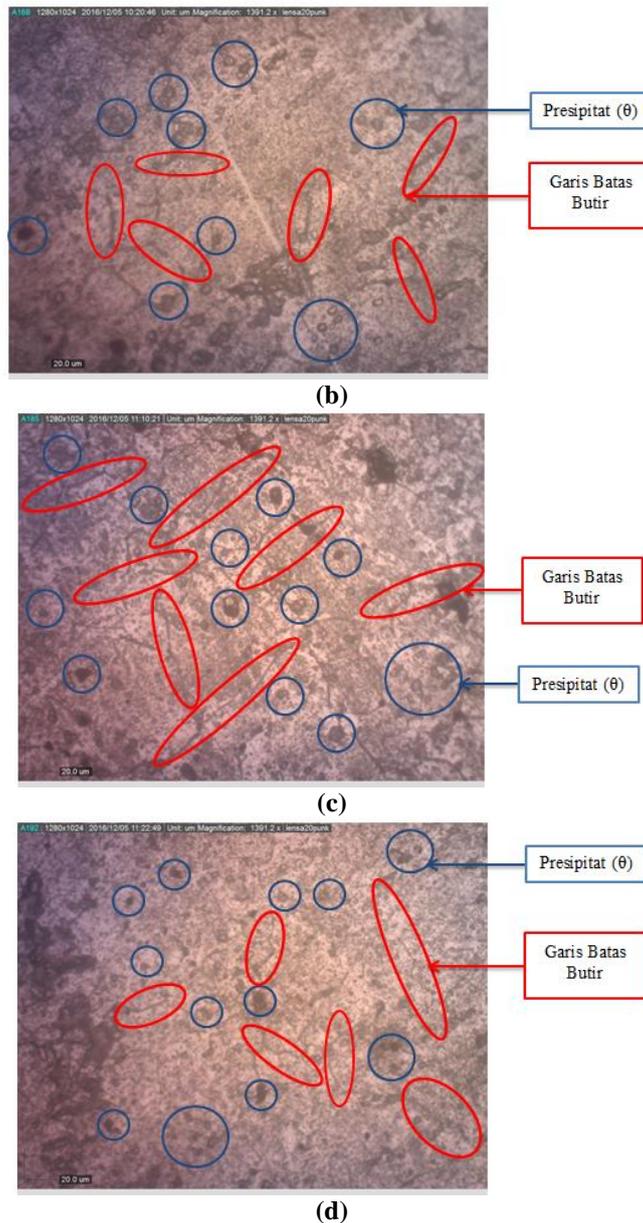
#### 3.1. Persebaran presipitat

Pengamatan pada presipitat bertujuan untuk mengetahui sifat kekerasan duralium dengan cara menganalisis dan membandingkan persebaran presipitat dan garis butir spesimen pada masing-masing variasi kelompok perlakuan. Berikut merupakan hasil foto mikro duralium yang mengalami proses multistage artificial aging dengan variasi multistage I, II, dan III.

Gambar 2 merupakan hasil foto mikro duralium dengan menggunakan *Optical Microscope* dengan pembesaran 1300 kali. Sebelum foto mikro diambil, maka spesimen terlebih dahulu dipolesh dan dietsa dengan menggunakan larutan HF.



(a)



**Gambar 2.** Persebaran presipitat pada paduan Al2024 akibat penuaan buatan bertingkat (a) raw material; (b) tingkat I, (c) tingkat II, (d) tingkat III.

Berdasarkan pengamatan pada gambar 2 di atas tampak bahwa presipitat ( $\theta'$ ) ( $\text{CuAl}_2$ ) cenderung tersebar merata pada permukaan setiap spesimen. Presipitat ( $\theta'$ ) ( $\text{CuAl}_2$ ) ditunjukkan dengan butiran berupa bintik-bintik berwarna hitam pada yang menyebabkan material memiliki nilai kekerasan tinggi. Presipitat ( $\theta$ ) pada duralium akibat proses *multistage artificial aging III (stage III)* terlihat lebih banyak dibandingkan dengan duralium yang mengalami proses *stage I* dan *II*. Matrik Al pada hasil foto mikro ini ditunjukkan dengan warna terang. Batas butir pada hasil foto mikro duralium akibat proses *multistage artificial aging* dengan media pendingin campuran 20 % *dromus oil* dan air terlihat jelas dan berbentuk pipih. Daerah berwarna terang merupakan daerah fasa  $\alpha$ , daerah berwarna gelap merupakan daerah fasa  $\theta$ , sedangkan butiran berwarna gelap merupakan presipitat  $\theta'$  ( $\text{CuAl}_2$ ) [12].

Pembentukan presipitat pada duralium akibat proses *multistage artificial aging* pada awalnya terbentuk pada garis butir duralium. Papazian (1981: 22) menjelaskan

pembentukan presipitat ( $\theta$ ) akibat proses *retrogression and re-aging (RRA)* terjadi pada garis butir. Hal ini dapat dilihat pada gambar hasil foto mikro duralium bahwa presipitat ( $\theta$ ) terletak pada garis butir, bahkan terdapat presipitat yang terbentuk di dalam butir [13].

Proses pengerasan presipitat pada paduan Al-Cu dapat diidentifikasi dalam 5 tahap, yaitu:

*Super Saturated Solid Solution  $\alpha$*   $\rightarrow$  GP Zone 1  $\rightarrow$  GP Zone 2 ( $\theta''$ )  $\rightarrow$  Fasa  $\theta'$   $\rightarrow$  Fasa  $\theta$ .

Pengerasan presipitat seharusnya koheren atau semi-koheren, biasanya matriks aluminium memiliki presipitat yang koheren atau semi-koheren. Presipitat koheren memiliki kisi ketidakcocokan yang kecil dengan matriks logam, dan terdapat kisi ketegangan antarmuka yang rapat. Nilai koherensi yang kecil akan berpengaruh pada kekerasan logam, semakin kecil nilai koherensinya maka kekerasan akan

meningkat dimana hal ini fasa yang terbentuk adalah fasa  $\theta'$ , sedangkan apabila nilai koherensinya sudah tidak ada sama sekali, kekerasan logam justru akan menurun (fasa  $\theta$ ) [14].

Perubahan dari fasa  $\theta'$  menjadi fasa  $\theta''$  merupakan tahap terjadinya peningkatan harga kekerasan tertinggi. Kemudian Abdillah (2010: 18) menjelaskan bahwa apabila paduan aluminium dinaikkan temperatur *aging* atau waktu *aging* diperpanjang tetapi dengan temperatur tetap, maka akan terbentuk presipitasi dengan struktur kristal yang berbeda dengan fasa  $\theta$  [15].

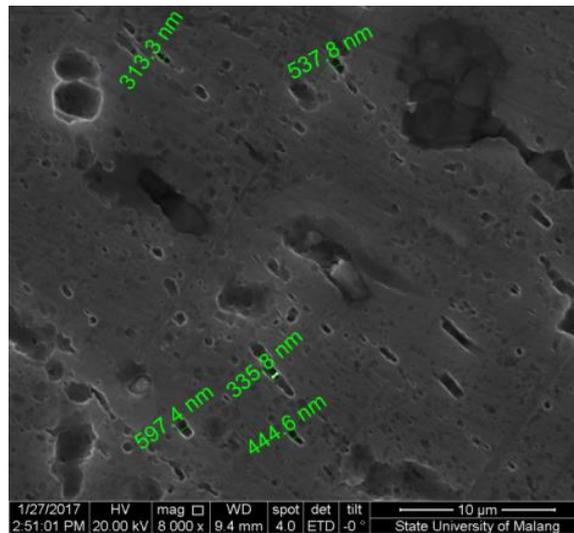
Puncak *aging* pertama yang merupakan transisi dari GP zone 2 ( $\theta''$ ) menjadi fasa  $\theta'$  meningkat yang secara signifikan sehingga kekerasan material pada fasa  $\theta'$  meningkat [16]. Paduan aluminium dengan 4% Cu dapat di-*quench* dengan suhu  $>540\text{ }^{\circ}\text{C}$  di suhu kamar untuk membentuk fase tunggal,  $\alpha$ , yang mengandung Cu dalam keadaan jenuh. Pemberian sebuah perlakuan panas yang tepat, akan membentuk endapan keseimbangan yaitu  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ ). Namun, dalam proses *multistage*, *aging* pada suhu  $<180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zona kaya tembaga yang koheren dengan kisi-kisi akan terbentuk. Tahap ini dikenal

sebagai GP1 zone dan GP 2 zone. Duralium merupakan kelompok paduan Al-Cu, apabila di-*quench* pada suhu  $>550\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan *aging* pada suhu optimum dengan waktu yang optimal maka membentuk sub-mikroskopis yang sangat halus dispersi dari  $\theta''$  dan  $\theta'$  yang koheren dengan matriks. Koherensi tegang (*strain*) pada presipitat berkontribusi pada peningkatan kekuatan duralium secara signifikan.

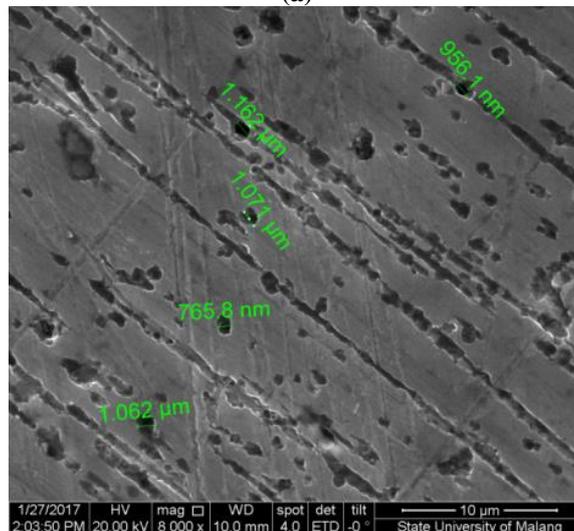
Penelitian ini membuktikan bahwa dengan menggunakan perlakuan panas *multistage artificial aging* maka dapat diidentifikasi fasa  $\theta'$  yang memberikan sifat penguatan pada material. Terbukti dengan jumlah presipitat yang terbentuk bertambah seiring dengan bertambahnya waktu dengan temperatur tetap (konstan). Pada proses *multistage artificial aging* fasa  $\theta'$  terbentuk dari transisi GP zone 2 ( $\theta''$ ) menjadi fasa  $\theta'$  yang merupakan koheren presipitat terhadap matriks duralium.

### 3.2. Morfologi pada paduan Al2024

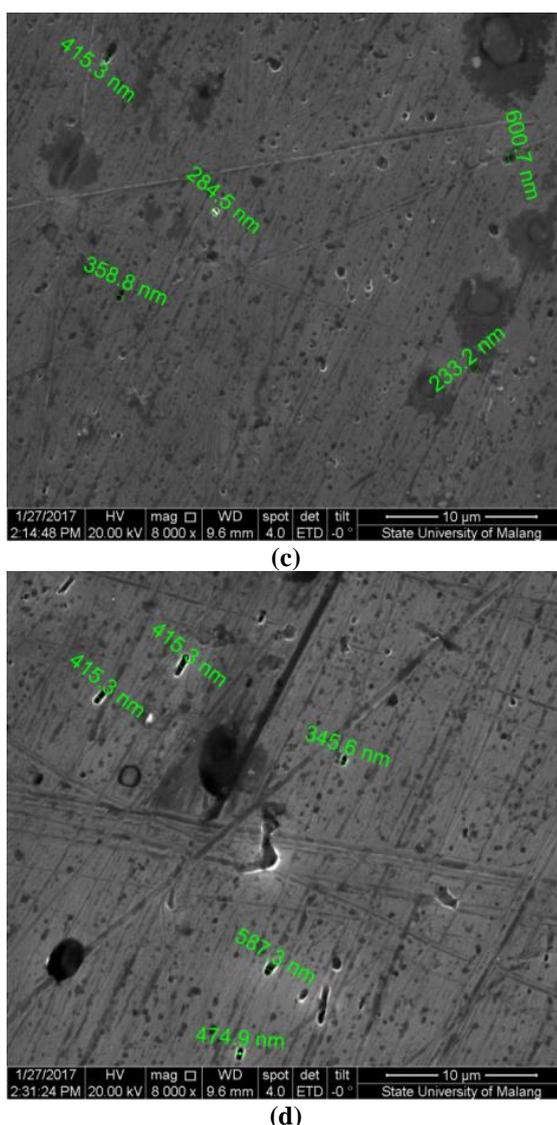
Gambar berikut merupakan hasil foto SEM duralium yang telah mendapatkan perlakuan Multistage Artificial Aging.



(a)



(b)



**Gambar 3.** Morfologi paduan Al2024 akibat penuaan buatan bertingkat (a) *raw material*; (b) tingkat I; (c) tingkat II, (d) tingkat III.

Pada beberapa hasil foto SEM pada duralium dengan perlakuan *multistage artificial aging* di atas menunjukkan permukaan spesimen yang telah di-*polish* dan di-tsa dengan cairan HF. Pada permukaan spesimen terlihat butir-butir presipitat ( $\theta$ ) yang tersebar merata dengan ukuran yang hampir sama dengan jumlah yang semakin banyak dari *stage I* hingga *stage III*. Ukuran rata-rata presipitat ( $\theta$ ) yang diambil dari lima titik presipitat ( $\theta$ ) pada spesimen tanpa dan dengan perlakuan *multistage artificial aging* dapat dilihat pada tabel 1. Jarak antar butir presipitat ( $\theta$ ) pada duralium akibat perlakuan *multistage artificial aging* terlihat relatif dekat.

**Tabel 1.** Ukuran presipitat pada paduan Al2024 akibat penuaan buatan bertingkat

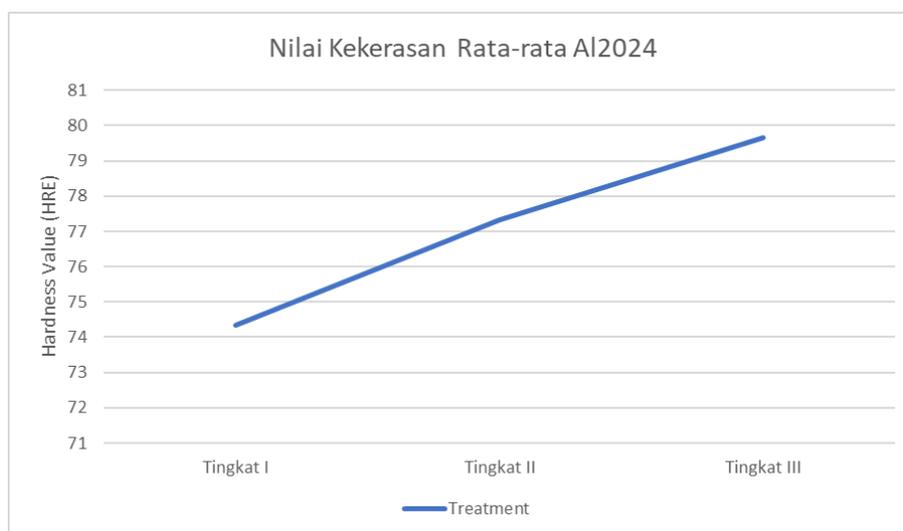
No	Perlakuan	Ukuran Presipitat (nm)
1	Raw material	445.78 nm
2	Tingkat I	1003.38 nm
3	Tingkat II	378.5 nm
4	Tingkat III	477.68 nm

Struktur mikro duralium yang dihasilkan dari proses *multistage artificial aging I, II, dan III* relatif sama (homogen). Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Papazian (1981), ia menyebutkan aluminium alloy dengan perlakuan *retrogression and re-aging (RRA)* memiliki struktur mikro yang sama. Artinya, presipitat yang terbentuk akibat proses *multistage artificial aging I, II, dan III* memiliki ukuran serta bentuk yang hampir sama. Garis batas butir presipitat pada umumnya kecil, melingkar pada bidang butir. Nurawati, menjelaskan bahwa ukuran butir dan jarak antar butir berpengaruh pada kekerasan material. Ukuran butir yang lebih kecil mempunyai batas butir yang lebih banyak dan dapat menghambat gerak dislokasi lebih kuat, sehingga paduan Al seri 6063 pada keadaan awalnya akan mempunyai sifat yang lebih keras dibandingkan dengan paduan Al seri 6063 setelah perlakuan panas. Perlakuan *aging* selama 2 jam, dislokasi partikel dimulai pada lingkaran di sekitar partikel. Dalam tahap ini, *strain* ketidakcocokan itu besar, terdapat interface-coherent, atau pemisahan partikel rata-rata di atas nilai kritis tertentu, maka dislokasi tidak mampu untuk memotong melalui presipitat, tetapi hanya pada lingkaran partikel tersebut.

Perlakuan *multistage artificial aging* pada duralium menyebabkan ukuran partikel pada setiap stagenya menjadi lebih kecil dengan jarak yang cukup dekat pada setiap variasi *stage*-nya. Hal ini menyebabkan dislokasi partikel terdispersi secara merata yang dapat meningkatkan kekerasan duralium pada setiap variasi *stage artificial aging*.

### 3.3 Angka kekerasan paduan Al2024

Pengujian kekerasan pada spesimen dilakukan dengan menggunakan mesin uji kekerasan model *Rockwell* dengan data yang dihasilkan berupa angka dengan beban minor 10 kg dan beban mayor 100 kg. Pengujian dilakukan dengan menggunakan skala E dengan indenter *1/8" steel ball*. Spesimen yang diamati adalah duralium yang mengalami proses *multistage artificial aging* dengan variasi *stage* I, II, dan III. Gambar 4 berikut menunjukkan angka kekerasan pada duralium.



**Gambar 4.** Grafik hasil pengujian kekerasan rata-rata paduan Al2024 akibat perlakuan penuaan buatan bertingkat

Melihat peningkatan nilai kekerasan pada gambar 4 membuktikan bahwa perlakuan *multistage artificial aging* berpengaruh terhadap tingkat kekerasan duralium. Angka rata-rata kekerasan pada duralium yang mengalami proses *multistage artificial aging I* menunjukkan pada angka 74.33 HRE. Angka rata-rata kekerasan duralium yang mengalami proses *multistage artificial aging II* mengalami kenaikan, yaitu 77.33 HRE. Sedangkan angka kekerasan rata-rata duralium yang mengalami proses *multistage artificial aging III* menunjukkan angka kekerasan tertinggi yaitu 79.66 (HRE). Dari hasil pengujian tersebut terlihat dengan jelas perbedaan angka kekerasan yang dimiliki oleh duralium yang telah mengalami proses *multistage artificial aging* dengan variasi *multistage* I, II, dan III dengan media pendingin berupa campuran 20 % *dromus oil* dan air.

Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hassan, Adel Mahmood *et al.* (2007), bahwa kekerasan pada aluminium alloy dapat meningkat seiring dengan bertambahnya waktu *re-aging* pada spesimen. Penelitian yang dilakukan oleh Mulyanti (2011) menunjukkan bahwa perlakuan *artificial aging* meningkatkan kekerasan paduan aluminium. Yulfitra (2012) menjelaskan adanya presipitat ( $\theta$ ) yang terdispersi secara merata di batas butir dapat meningkatkan kekerasan paduan aluminium. Hasil penelitian Correa-Avendano (2014) menunjukkan nilai kekerasan maksimal akibat proses *aging* didapatkan pada proses *aging* selama 3 jam dan 2 jam. Selain itu, hasil penelitian Liu *et al.* (2015) menunjukkan bahwa angka kekerasan aluminium alloy meningkat akibat proses *multistage aging treatment* pada suhu *artificial aging*. Kekerasan duralium akibat proses *multistage artificial aging I, II, dan III* meningkat yang dipengaruhi oleh lama *aging*, dan persebaran presipitat ( $\theta$ ).

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada duralium dengan perlakuan *multistage artificial aging* dengan variasi *stage* I, II, dan III terhadap struktur mikro dan kekerasan duralium, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

Berdasarkan data hasil uji foto mikro duralium yang mengalami perlakuan panas *multistage artificial aging*, struktur mikro pada duralium dapat dilihat bahwa persebaran presipitat ( $\text{CuAl}_2$ ) paling banyak ditemukan pada duralium dengan variasi *multistage* III. Pada variasi *multistage* II persebaran presipitat ( $\text{CuAl}_2$ ) tersebar merata di seluruh permukaan spesimen yang berbentuk titik-titik hitam dengan ukuran yang relatif sama dengan jumlah yang lebih banyak apabila dibandingkan dengan spesimen variasi *stage* I. Sedangkan persebaran presipitat ( $\text{CuAl}_2$ ) paling sedikit ditemukan pada duralium dengan variasi *stage* I. Dengan melakukan perlakuan *multistage artificial aging* pada duralium maka dapat diidentifikasi fasa  $\theta'$  yang memberikan sifat penguatan pada material. Terbukti dengan jumlah presipitat ( $\text{CuAl}_2$ ) yang terbentuk bertambah seiring dengan bertambahnya waktu dengan temperatur tetap (konstan). Pada proses *multistage artificial aging* fasa  $\theta'$  terbentuk dari transisi GP zone 2 ( $\theta''$ ) menjadi fasa  $\theta'$  yang merupakan koheren presipitat terhadap matriks duralium. Sedangkan hasil pengamatan morfologi duralium akibat perlakuan *multistage artificial aging* dengan menggunakan SEM, struktur mikro pada duralium relatif sama (homogen) pada setiap variasi *stage*-nya. Perlakuan *multistage artificial aging* pada duralium menyebabkan ukuran partikel pada setiap stagenya menjadi

lebih kecil dengan jarak yang cukup dekat pada setiap variasi *stage*-nya.

Berdasarkan hasil uji kekerasan duralium, angka kekerasan paling tinggi adalah duralium yang mengalami proses *multistage artificial aging III* yaitu 79.66 HRE. Angka kekerasan duralium yang mengalami proses *multistage artificial aging II* adalah 77.33 HRE. Sedangkan duralium dengan angka kekerasan terendah adalah duralium yang mengalami proses *stage artificial aging I* yaitu 74.33 HRE. Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa perlakuan panas *multistage artificial aging* berpengaruh pada persebaran presipitat serta morfologi duralium yang juga mempengaruhi sifat mekanis duralium yaitu peningkatan kekerasan material.

## Referensi

- [1] J. R. Davis, "Aluminum and Aluminum Alloys," *Light Met. Alloy.*, p. 66, 2001, doi: 10.1361/autb2001p351.
- [2] P. Puspitasari, D. Puspitasari, M. I. N. Sasongko, Andoko, and H. Suryanto, "Tensile strength differences and type of fracture in artificial aging process of duralium against cooling media variation," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1778, pp. 0–4, 2016, doi: 10.1063/1.4965746.
- [3] Anne Zulfia, Ratna Juwita, Ari Uliana, I Nyoman Jujur, and Jarot Raharjo, "Proses Penuaan (Aging) pada Paduan Aluminium AA 333 Hasil Proses Sand Casting," *J. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 13–20, 2010, doi: 10.9744/jtm.12.1.13-20.
- [4] D. Elabar, G. R. La Monica, M. Santamaria, F. Di Quarto, P. Skeldon, and G. E. Thompson, "Anodizing of aluminium and AA 2024-T3 alloy in chromic acid: Effects of sulphate on film growth," *Surf. Coatings Technol.*, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.11.108.
- [5] D. I. Tsamroh, P. Puspitasari, A. Andoko, A. A. Permanasari, and P. E. Setyawan, "Optimization of multistage artificial aging parameters on Al-Cu alloy mechanical properties," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 87, no. 2, pp. 62–67, 2018, doi: 10.5604/01.3001.0012.2828.
- [6] P. Puspitasari and D. Izza, "Duralium Behavior in Multistage," *Nanosci. Technol. An Int. J.*, vol. 8, no. 3, pp. 223–230, 2017.
- [7] P. D. Merica, R. G. Waltenberg, and H. Scott, "Heat treatment of Duralumin," *Sci. Pap.*, pp. 271–315, 1919.
- [8] S. J. Andersen, C. D. Marioara, J. Friis, S. Wenner, and R. Holmestad, "Precipitates in aluminium alloys," *Adv. Phys. X*, vol. 3, no. 1, pp. 790–814, 2018, doi: 10.1080/23746149.2018.1479984.
- [9] E. F. Abo Zeid, "Mechanical and electrochemical characteristics of solutionized AA 6061, AA6013 and AA 5086 aluminum alloys," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 1870–1877, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2018.12.014.
- [10] W. F. Smith, H. Javad, and R. Prakash, *Introduction to Materials Science and Engineering*. 2015.
- [11] Arikunto, "Metodelogi Penelitian, Suatu Pengantar Pendidikan," in *Rineka Cipta, Jakarta*, 2019, p. 21.
- [12] C. Chen, X. Yin, W. Liao, Y. Xiang, M. Gao, and Y. Zhang, "Microstructure and properties of 6061/2A12 dissimilar aluminum alloy weld by laser oscillation scanning," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 14, pp. 2789–2798, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.105.
- [13] A. Cochard *et al.*, "Natural aging on Al-Cu-Mg structural hardening alloys – Investigation of two historical duralumins for aeronautics," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 690, pp. 259–269, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.03.003.
- [14] M. Prudhomme *et al.*, "Effect of actual and accelerated ageing on microstructure evolution and mechanical properties of a 2024-T351 aluminium alloy," *Int. J. Fatigue*, vol. 107, no. October 2017, pp. 60–71, 2018, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.10.015.
- [15] Y. Zhang and Z. Guo, "Electrochemical properties and microstructure of Pb-Co anodes during electrolysis in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution," *J. Alloys Compd.*, vol. 780, pp. 131–136, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.11.373.
- [16] R. xian Yang, Z. yi Liu, P. you Ying, J. lin Li, L. hua Lin, and S. min Zeng, "Multistage-aging process effect on formation of GP zones and mechanical properties in Al??Zn??Mg??Cu alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 26, no. 5, pp. 1183–1190, 2016, doi: 10.1016/S1003-6326(16)64221-8.