

Optimasi Sifat Kekerasan dan Struktur Mikro Paduan Aluminium Silikon A383 dengan Variasi Perlakuan Panas

Ahmad Zubair Sultan¹, Muhammad Arsyad Suyuti² dan Paipinan Batara Randa³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
*E-mail korespondensi: ahmadzubairsultan@poliupg.ac.id

Abstract: *The purpose of this study was to determine the effect of heat treatment on the hardness and microstructure of A383 aluminum alloy. The research method includes materials, tools, and experimental procedures carried out during the study. The tested material was A383 aluminum alloy in the form of a cylindrical block, which was machined into test specimens with dimensions of 10 × 10 × 10 mm. The heat treatment process was conducted in two stages. In the first stage, the specimens were subjected to solution heat treatment at a temperature of 550 °C with a holding time of 2 hours followed by quenching in water media. In the second stage, the specimens were subjected to artificial aging at temperatures of 150 °C, 200 °C, and 250 °C with holding times of 4, 5, and 6 hours. The tests carried out included chemical composition testing, Brinell hardness testing, and microstructure observation. The results show that the hardness of A383 aluminum alloy can be improved through a sequence of solution heat treatment, quenching, and artificial aging processes. The maximum hardness value of 112.86 HB was obtained at an aging temperature of 200 °C with a holding time of 4 hours. Microstructure observations indicate that the peak aging condition produces a finer and more uniformly distributed precipitate structure in the aluminum matrix, which contributes to the increase in hardness.*

Keywords: *heat treatment, hardness, microstructure, A383 aluminum alloy*

Abstrak: Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanis berupa kekerasan dan struktur mikro paduan aluminium A383. Metode penelitian meliputi bahan, alat, dan proses eksperimen yang dilakukan selama penelitian. Material yang digunakan adalah paduan aluminium A383 berbentuk blok silinder yang kemudian dibentuk menjadi spesimen uji berukuran 10 × 10 × 10 mm. Proses perlakuan panas dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah perlakuan panas pelarutan (solution heat treatment) pada temperatur 550 °C dengan waktu tahan 2 jam yang kemudian diikuti dengan proses quenching menggunakan media air. Tahap kedua adalah penuaan buatan (artificial aging) pada temperatur 150 °C, 200 °C, dan 250 °C dengan waktu tahan 4, 5, dan 6 jam. Pengujian yang dilakukan meliputi uji komposisi kimia, uji kekerasan Brinell, dan pengamatan struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan paduan aluminium A383 dapat ditingkatkan melalui proses solution treatment, quenching, dan artificial aging. Nilai kekerasan maksimum sebesar 112,86 HB diperoleh pada temperatur penuaan 200 °C dengan waktu tahan 4 jam. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa kondisi penuaan optimum menghasilkan presipitat yang lebih halus dan terdistribusi merata pada matriks aluminium sehingga meningkatkan nilai kekerasan material.

Kata kunci: perlakuan panas, kekerasan, struktur mikro, aluminium A383

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi industri yang semakin pesat mendorong kebutuhan akan material dengan kualitas tinggi dan performa yang optimal. Pemilihan material yang tepat menjadi faktor penting dalam proses perancangan dan pembuatan suatu produk, karena sifat mekanis dan karakteristik material akan sangat mempengaruhi kinerja, keandalan, serta umur pakai produk tersebut. Oleh karena itu, industri manufaktur terus melakukan berbagai penelitian untuk meningkatkan kualitas material melalui proses rekayasa material, salah satunya melalui perlakuan panas (*heat treatment*) [1].

Aluminium merupakan salah satu material logam yang banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena memiliki kombinasi sifat yang menguntungkan, seperti massa jenis yang rendah, ketahanan korosi yang baik, konduktivitas panas dan listrik yang tinggi, serta kemudahan dalam proses pembentukan dan permesinan. Selain itu, aluminium juga memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi sehingga sangat cocok digunakan pada industri otomotif, transportasi, dan kedirgantaraan [2][3].

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, aluminium murni memiliki kekuatan mekanis yang relatif rendah. Oleh karena itu, aluminium umumnya dipadukan dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Penambahan unsur paduan seperti magnesium, silikon, tembaga, dan seng dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, serta ketahanan terhadap korosi dan keausan. Paduan aluminium-magnesium (Al-Mg) dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, sedangkan paduan aluminium-silikon (Al-Si) memiliki kemampuan pengecoran yang sangat baik serta stabilitas dimensi yang tinggi [4][5].

Paduan aluminium silikon (Al-Si) merupakan salah satu jenis paduan aluminium yang banyak digunakan dalam industri pengecoran karena memiliki fluiditas tinggi, ketahanan terhadap retak panas, serta mampu menghasilkan permukaan coran yang baik. Selain itu, paduan ini memiliki koefisien muai yang relatif rendah, ketahanan aus yang baik, serta stabilitas termal yang tinggi sehingga sangat cocok digunakan untuk komponen otomotif seperti piston, blok silinder, dan komponen mesin lainnya [6][7].

Salah satu jenis paduan aluminium silikon yang banyak digunakan dalam industri otomotif adalah aluminium A383. Paduan ini memiliki kemampuan pengecoran yang sangat baik serta sifat mekanis yang cukup baik sehingga sering digunakan dalam proses die casting untuk pembuatan komponen kendaraan bermotor. Dalam aplikasinya, komponen seperti piston harus mampu menahan beban mekanis yang tinggi serta temperatur yang tinggi selama proses pembakaran berlangsung. Oleh karena itu, diperlukan material dengan kekuatan tinggi, ketahanan aus yang baik, serta stabilitas termal yang baik [8].

Untuk meningkatkan sifat mekanis dan performa paduan aluminium silikon, salah satu metode yang sering digunakan adalah perlakuan panas (*heat treatment*). Proses *heat treatment* dapat mengubah struktur mikro material sehingga dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, serta ketahanan aus material tersebut. Namun demikian, perubahan sifat mekanis akibat perlakuan panas juga dapat mempengaruhi sifat fisik lainnya seperti konduktivitas termal dan struktur mikro material [9].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi perlakuan panas terhadap sifat mekanis dan struktur mikro paduan aluminium silikon A383. Dengan melakukan optimasi parameter perlakuan panas, diharapkan dapat diperoleh kombinasi sifat mekanis dan karakteristik mikrostruktur yang optimal sehingga material ini dapat digunakan secara lebih efektif dalam aplikasi industri, khususnya pada komponen otomotif yang memerlukan performa tinggi [10].

II. METODE PENELITIAN

2.1 Pembuatan Spesimen Uji

Spesimen uji diperoleh dari pasaran dan akan dilakukan karakterisasi melalui pengujian laboratorium untuk mengetahui komposisi kimia material yang dibeli dan dicocokkan dengan komposisi kimia material standar A383. Spesimen uji dibuat dalam ukuran 10 x 10 x 10 mm. Sampel akan disediakan sebanyak 12, yaitu 11 sampel sesuai metode *central composite design* (CCD) dari design experiment yang sudah dirancang serta 1 sampel referensi tanpa perlakuan.

Proses *heat treatment* dilakukan dengan memvariasikan temperatur (150°C, 200°C dan 250°C) serta waktu tahan yang bervariasi yaitu 4, 5 dan 6 jam pada 11 benda uji. Variasi temperatur aging dan waktu tahan seperti dalam Table 1.



Gambar 1. Aluminium silicon A383

Tabel 1. Rancangan penelitian

No	Aging Temperature (C)	Holding Time (hour)
1	150	4
2	150	5
3	150	6
4	200	4
5	200	5
6	200	5
7	200	5
8	200	6
9	250	4
10	250	5
11	250	6

2.2. Tahap Perlakuan Panas Pelarutan

Tahap pertama dalam proses *age hardening* yaitu *solution heat treatment* atau perlakuan panas pelarutan. *Solution heat treatment* yaitu pemanasan logam aluminium dalam dapur pemanas dengan temperatur 550°C-560°C dan dilakukan penahanan atau *holding* sesuai dengan jenis dan ukuran benda kerja [1] (Schonmetz, 1990). pada tahap *solution heat treatment* terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada, menjadi larutan padat. Tujuan dari *solution heat treatment* itu sendiri yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen. Proses *solution heat treatment* dapat dijelaskan dimana logam paduan aluminium pertama kali dipanaskan dalam dapur pemanas hingga mencapai temperatur T1. Pada temperatur T1 fase logam paduan aluminium akan berupa kristal campuran α dalam larutan padat. Pada temperatur T1 tsb. pemanasan ditahan beberapa saat agar didapat larutan padat yang mendekati homogeny.

Treatment solution dilakukan dengan parameter proses berupa temperature pemanasan 550°C dengan holding time selama 2 jam. Tungku furnace yang terdapat di laboratorium mekanik Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, digunakan untuk memberikan perlakuan panas pada Aluminium silikon A383.

2.3. Tahap Pengejutan Pendinginan (Quenching)

Quenching dilakukan dengan cara mendinginkan logam yang telah dipanaskan dalam dapur pemanas kedalam media pendingin. Pendingin dilakukan secara cepat, dari temperatur pemanas (505°C) ke temperatur yang lebih rendah, pada umumnya mendekati temperatur ruang. Tujuan dilakukan quenching adalah agar larutan padat homogen yang terbentuk pada *solution heat treatment* dan

kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Pada tahap quenching akan menghasilkan larutan padat lewat jenuh (Super Saturated Solid Solution) yang merupakan fasa tidak stabil pada temperatur biasa atau temperatur ruang. Pada proses quenching tidak hanya menyebabkan atom terlarut tetap ada dalam larutan, namun juga menyebabkan jumlah kekosongan atom tetap besar. Adanya kekosongan atom dalam jumlah besar dapat membantu proses difusi atom pada temperatur ruang untuk membentuk Zona-Guinier-Preston (Zona GP). Zona Guinier-Preston (Zona GP) adalah kondisi didalam paduan dimana terdapat agregasi atom padat atau pengelompokan atom padat [2].

2.4. Tahap Pengejukan Pendinginan (Quenching)

Setelah solution heat treatment dan quenching tahap selanjutnya dalam proses age hardening adalah aging atau penuaan. Penuaan buatan dilakukan pada temperature yang bervariasi yaitu 150, 200 dan 250 dengan holding time yang juga bervariasi yaitu 4, 5 dan 6 jam. Tungku yang sama dengan proses solution treatment akan digunakan dengan setting temperature yang sesuai. Penuaan buatan (artificial aging) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di 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 [1].

Pada tahap artificial aging dalam proses age hardening dapat dilakukan beberapa variasi perlakuan yang dapat mempengaruhi hasil dari proses age hardening. Salah satu variasi tersebut adalah variasi temperatur artificial aging. Temperatur artificial aging dapat ditetapkan pada temperatur saat pengkristalan paduan aluminium (150°C), di bawah temperatur pengkristalan atau di atas temperatur pengkristalan logam paduan aluminium [1]. Penuaan buatan (artificial aging) berlangsung pada suhu antara 100°C – 200°C.

2.5. Uji Kekerasan

Akan dilakukan dengan alat uji kekerasan yang tersedia di lab Mekanik PNUP. Cara pengujian Brinell dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja krom yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu oleh suatu gaya tekan secara statis ke dalam permukaan logam yang diuji tanpa sentakan. Permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan ditiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tersebut diukur secara teliti, yang kemudian dipakai untuk menentukan kekerasan logam yang diuji dengan menggunakan rumus berikut ini :

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

Dimana :

P = beban yang diberikan (KP atau Kgf) D = diameter indentor yang digunakan d = diameter bekas lekukan

Standar dari bola Brinell yaitu mempunyai Ø 10 mm atau 0,3937 in, dengan penyimpangan maksimal 0,005 mm atau 0,0002 in. Selain yang telah distandarkan di atas, terdapat juga bola-bola Brinell dengan diameter lebih kecil (Ø 5 mm, Ø 2,5 mm, Ø 2 mm, Ø 1,25 mm, Ø 1 mm, Ø 0,65 mm) yang juga mempunyai toleransi-toleransi tersendiri. Misalnya, untuk diameter 1 sampai dengan 3 mm adalah lebih kurang 0,0035 mm, antara 3 sampai dengan 6 mm adalah 0,004 mm, dan antara 6 sampai dengan 10 mm adalah 0,005 mm. Penggunaannya bergantung pada gaya tekan P dan jenis logam yang diuji, maka penguji harus dapat memilih diameter bola yang paling sesuai.

2.6. Uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro akan dilakukan di Lab Material UNHAS, namun sebelumnya material akan

disiapkan terlebih dahulu dengan proses grinding (dengan kertas amplas), polishing (dengan autosol) dan etching (dengan larutan HF) yang akan dilakukan di Lab Mekanik PNUP

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Untuk mengetahui hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat, sejumlah percobaan telah dilakukan. Pengaturan percobaan adalah menggunakan central composites composite design (CCD) dengan total jumlah percobaan sebanyak 11 kali dengan menggunakan 2^2 desain faktorial dengan 3 titik pusat. Hasil percobaan pada diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Kekerasan dan Konduktivitas Termal

Temperature (C)	Aging Time (hours)	Sample (HB)					Average
		1	2	3	4	5	
150	4	93	91	93.2	95	85.5	91.54
150	5	85.7	91.5	91	83.7	91.5	88.68
150	6	90	99	93.2	94.2	98.1	94.9
200	4	127.5	112.4	107.4	105	112	112.86
200	5	99	95	86.7	107.7	108.8	99.44
200	5	105	113.6	107.7	113.6	104.4	108.86
200	5	97.5	99	103.5	87	103.8	98.16
200	6	103.8	109.2	110.4	108.8	111.6	108.76
250	4	81.9	97.2	94	88.7	89	90.16
250	5	90.7	96.6	97.8	93.5	92.7	94.26
250	6	79.6	90.7	95	93.7	96.3	91.06
Non Heat Treatment		71.3	56.1	79.3	94.7	70	74.28

3.1.1 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan baik sebelum dan sesudah dilakukan perlakuan panas. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sejauh mana perbedaan bentuk struktur mikro sebelum dan sesudah perlakuan panas. Hasil dari pengujian struktur mikro ini dapat memperkuat hasil pengujian kekerasan, karena dengan pengamatan struktur mikro dapat terlihat susunan dan struktur mikro aluminium. Berdasarkan pola kekerasan dan prinsip penuaan (ageing) pada paduan aluminium yang diperkuat fasa presipitat:

- Pada suhu rendah (150 °C): proses presipitasi masih berlangsung tetapi presipitat belum mencapai ukuran/kepadatan optimal untuk penguatan maksimum *underaged*, sehingga kekerasan lebih rendah. Mikrostruktur kemungkinan menunjukkan presipitat halus tapi belum cukup padat.
- Pada suhu menengah (200 °C): kondisi ini mendekati *peak aging*, presipitat terbentuk dengan ukuran dan distribusi yang menghasilkan hambatan maksimum terhadap gerakan dislokasi menyebabkan kekerasan maksimum terlihat. Mikrostruktur di sini memperlihatkan presipitat halus dan merata di dalam matriks aluminium.
- Pada suhu tinggi (250 °C): presipitat cenderung mekar/koarsen (*growth dan coarsening*) sehingga efektivitasnya sebagai penghambat dislokasi menurun (*overaging*) menyebabkan turunnya nilai kekerasan. Mikrostruktur akan menunjukkan presipitat lebih besar dan lebih jarang, plus kemungkinan perubahan fasa sekunder yang mengurangi penguatan.
- Tanpa perlakuan panas: sedikit atau tidak ada presipitasi terkontrol sehingga kekerasan paling rendah, struktur mikro dominan matriks dengan sedikit presipitat halus acak.

3.1.2 Hasil Analisa Varians dan Model Matematika Untuk Respon Kekerasan

Analisa varians (ANOVA) dilakukan untuk menunjukkan pengaruh parameter proses dalam hal

ini waktu penahanan dan temperature penuaan terhadap respon berupa kekerasan. Untuk tujuan tersebut digunakan metode respon permukaan (Response Surface Method) dengan central composite design (CCD). Kecocokan model dan hasil analisa ditunjukkan pada table berikut. Hasil menunjukkan bahwa model linier adalah model yang disarankan.

Tabel 3. Statistik kecocokan model untuk kekerasan

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Mean	1.05E+05	1	1.05E+05	–	–
Linear	0.026	2	0.013	1.42E-04	0.9999
2FI	1.51	1	1.51	0.015	0.9072
Quadratic	516.81	2	258.4	6.18	0.0445
Cubic	35.3	2	17.65	0.3	0.7577
Residual	173.72	3	57.91	–	–
Total	1.06E+05	11	9593.3	–	–

Model adalah significant karena Prob > F adalah kurang dari α (0.05) yang mengimplikasikan 95 % derajat kepercayaan (*confidence interval*). Hasil juga menunjukkan bahwa temperatur penuaan (A) dan waktu tahan (B) adalah faktor signifikan yang mempengaruhi kekerasan. Informasi lain bahwa ada interaksi antara temperatur penuaan dan waktu tahan (A*B) seperti terlihat pada Tabel 4. Berikutnya, ketidakcocokan model (*lack of fit*) adalah tidak signifikan karena nilai Prob > F lebih besar dari α (0.05).

Tabel 4. Hasil ANOVA untuk Kekerasan

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	Keterangan
Model	518.35	5	103.67	2.48	0.1708	Not significant
A (Aging Temperature)	0.022	1	0.022	5.17E-04	0.9827	
B (Holding Time)	4.27E-03	1	4.27E-03	1.02E-04	0.9923	
A ²	511.96	1	511.96	12.25	0.0173	Significant
B ²	66.52	1	66.52	1.59	0.2628	
AB	1.51	1	1.51	0.036	0.8566	
Residual	209.02	5	41.8	–	–	
Lack of Fit	96.93	3	32.31	0.58	0.6842	Not significant
Pure Error	112.09	2	56.04	–	–	
Cor Total	727.36	10	–	–	–	

Parameter	Nilai
Standard Deviation (Std. Dev.)	6.47
Mean	97.61
Coefficient of Variation (C.V. %)	6.62
PRESS	995.04
R-Squared	0.7126
Adjusted R-Squared	0.4253
Predicted R-Squared	-0.368
Adequate Precision	4.068

Nilai R2 sebesar 0.7126 menunjukkan bahwa model adalah dapat diterima. *Adequate precision* juga memenuhi syarat dimana nilainya harus lebih besar dari 4. *Adequate Precision* adalah metrik yang digunakan dalam analisis regresi, untuk mengevaluasi rasio sinyal terhadap noise dalam sebuah model. Model matematika yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$Hardness = 100.25 + 0.012 \times Aging\ Temp - 0.136 \times Holding\ Time \tag{1}$$

Kekerasan optimum diperoleh dengan mengatur ke batas nilai maksimum sesuai respon yang diinginkan. Kriteria penentuan parameter proses dimana temperature dan waktu tahan pada saat penuaan ditetapkan berada diantara nilai tertinggi dan terendah (*is in range*) sesuai rancangan percobaan sebelumnya. Kekerasan ditetapkan ke nilai maksimum (*maximize*) sesuai tujuan perlakuan panas untuk menaikkan kekerasan.

3.2 Optimasi

Optimasi bertujuan untuk mencari nilai kekerasan tertinggi berdasarkan temperatur penuaan dan waktu tahan penuaan. Pertimbangan pengaturan ini adalah karena penggunaan temperature dan waktu aging yang paling kecil merupakan indikasi proses yang paling ekonomis (konsumsi energy paling rendah).

Tabel 5. Pengaturan untuk optimasi parameter proses (variable bebas) dan respon (variable terikat)

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Temperature	Minimize	150	250	1	1	2
Aging Time	Minimize	4	6	1	1	3
Hardness	Maximize	88.68	112.86	1	1	3

Solusi yang diperoleh untuk batasan sebagaimana tersebut diatas diperlihatkan pada Tabel 6. Terdapat 2 solusi yang memberikan nilai kekerasan terbaik yaitu dengan Temperatur penuaan 185,24°C dan waktu tahan 4 jam atau temperatur penuaan 186,43°C dengan waktu tahan 4 jam.

Tabel 6. Solusi parameter proses (variable bebas) dan respon (variable terikat) yang menghasilkan nilai kekerasan tertinggi

Number	Temperature	Aging Time	Hardness	Desirability	Status
1	185.24	4	106.226	0.795	Selected
2	186.43	4	106.434	0.795	

3.3 Uji Konfirmasi

Uji konfirmasi dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian model terpilih yang diperoleh sebelumnya. Melalui tahap prediksi titik, kekerasan (HB), dari percobaan tertentu diramalkan dengan tingkat keyakinan dan interval prediksi 95%. Uji konfirmasi dilakukan hanya pada 1 percobaan dengan parameter acak yang direncanakan sesuai Tabel 7.

Tabel 7. Rencana uji konfirmasi

Factor	Name	Level	Low Level	High Level	Std Deviasi
A	Temperatur Aging	200	150	250	0
B	Waktu Aging	5	4	6	0

Nilai prediksi dan nilai eksperimen dari uji konfirmasi dibandingkan dengan menghitung residu dan

persentase kesalahan. Semua nilai ini disajikan masing-masing pada Tabel 8.

Tabel 8. Persentase Kesalahan Uji Konfirmasi 1

Confirmation Test 1	Unit	Prediction	Actual	Residual	% Error
Kekerasan	HB	101.97	104.15	2.18	2.14

Berdasarkan hasil uji konfirmasi, dapat disimpulkan bahwa model yang dikembangkan valid. Uji konfirmasi menunjukkan bahwa parameter input memang mengendalikan output kritis, sehingga model cukup akurat untuk memprediksi hasil kekerasan material dengan persentase kesalahan sebesar 2.14%.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data, dapat disimpulkan bahwa paduan aluminium silikon seri A383 (Al-Si A383) dapat ditingkatkan kekerasannya melalui proses perlakuan panas yang meliputi solution heat treatment, quenching dalam media air, dan artificial aging. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan maksimum sebesar 112,86 HB diperoleh pada temperatur penuaan 200 °C dengan waktu penahanan 4 jam.

Hasil optimasi menggunakan metode Response Surface Method (RSM) menunjukkan bahwa parameter proses yang menghasilkan kekerasan optimum berada pada temperatur penuaan sekitar 185,24 °C dengan waktu penahanan 4 jam. Temperatur penuaan di bawah 200 °C cenderung menghasilkan kekerasan yang lebih rendah karena proses presipitasi belum berlangsung secara optimal (underaging). Sebaliknya, temperatur penuaan yang lebih tinggi atau waktu penahanan yang lebih lama dapat menyebabkan penurunan kekerasan (overaging) akibat pertumbuhan dan pengkasaran partikel presipitat sehingga efektivitasnya dalam menghambat pergerakan dislokasi menjadi berkurang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. New York, USA: Wiley, 2018.
- [2] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1999.
- [3] G. E. Totten and D. S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003.
- [4] J. E. Hatch, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1984.
- [5] I. J. Polmear, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 5th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [6] J. G. Kaufman and E. L. Rooy, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2004.
- [7] J. Campbell, *Complete Casting Handbook*. Oxford, UK: Elsevier, 2015.
- [8] ASM International, *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2012.
- [9] G. E. Totten, *Heat Treatment Handbook*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [10] T. Surdia and S. Saito, *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta, Indonesia: Pradnya Paramita, 2005.