

Karakteristik Deformasi Akibat Beban Impak dari Mikrostruktur Transisi Hasil Natural Aging Paduan Al-2024

Hairul Arsyad¹, Rahmatullah²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jln. Perintis Kemerdekaan Km. 10 Tamalanrea, Makassar, 90245

Email: ¹arsyadhairul@yahoo.com

Abstrak

Penelitian terhadap karakteristik deformasi akibat beban impak dari mikrostruktur transisi hasil natural aging dari paduan Al-2024 bertujuan untuk mengetahui kemampuan deformasi dari setiap mikrostruktur transisi dari paduan Al-2024. Paduan Al-2024 yang mengalami proses pengerasan endap mengalami beberapa perubahan mikrostruktur selama tahapan aging. Perubahan mikrostruktur tersebut terjadi dari kondisi fasa yang tidak stabil akibat perlakuan pendinginan cepat menuju fasa yang stabil dengan hadirnya fasa penguat dalam matrisnya. Selama transformasi mikrostruktur, paduan Al-2024 mengalami 4 kali perubahan yaitu mikrostruktur GP Zon, fasa θ'' , fasa θ' dan fasa kesetimbangan θ . Penelitian dilakukan dengan memanaskan spesimen dengan variasi diameter 5 mm, 8 mm, 10 mm dan 12 mm dengan tebal konstan 2 mm pada temperatur 550 °C. Setelah homogenisasi selama 1,5 jam spesimen di quench pada media pendingin air dan kemudian mengalami proses aging pada temperatur kamar. Pengujian impak diberikan pada spesimen setelah mengalami proses aging selama, 0.1 hari, 1 hari, 10 hari dan 100 hari. Pengujian impak dilakukan dengan menjatuhkan beban seberat 8 kg pada ketinggian 1.5 meter dengan metode open die forging. Setelah mengalami penempaan, spesimen kemudian diukur dimensi diameter, ketebalan akhir dan kekerasan. Dari hasil pengujian terlihat bahwa fasa pada 0.1 hari mengalami deformasi yang paling besar yaitu 36.6 % dan fasa pada 10 hari aging mengalami deformasi yang paling rendah yaitu 15.7 %. Dari hasil pengujian kekerasan diperoleh bahwa fasa 100 hari aging memiliki nilai kekerasan tertinggi yaitu sebesar 80 HRB dan fasa 0.1 hari aging memiliki kekerasan terendah yaitu 65 HRB.

Kata Kunci: Deformasi, impak, aging, mikrostruktur transisi

I. Pendahuluan

Aluminium dengan penambahan tembaga sebagai unsur paduan utama adalah salah satu kelompok paduan aluminium yang dikenal luas dalam aplikasinya. Paduan ini masuk kedalam kelompok paduan aluminium seri 2000. Paduan aluminium seri 2000 adalah golongan paduan aluminium mampu laku panas (Heat treatable alloy) disamping paduan aluminium yang tidak laku panas (non heat treatable). Sifat mekanik yang tinggi dari paduan ini diperoleh dengan mekanisme penguatan endapan (precipitation hardening) yang diperoleh dengan proses penuaan (aging process). Presipitasi ini terjadi melalui inisiasi fasa kedua pada mikrostruktur dari paduan aluminium tembaga yang di dinginkan cepat dari temperatur 550 °C dengan proses quench ketemperatur pendinginan.

Pendinginan cepat tersebut menyebabkan kondisi tanpa kesetimbangan pada temperatur quens yang menghambat pemisahan fasa sehingga pada temperatur rendah, paduan berada dalam keadaan lewat-jenuh tak stabil. Kondisi tersebut menyebabkan kehadiran fasa kedua yang terjadi melalui proses penuaan, fasa kedua atau presipitasi tersebut muncul sebagai bagian dari proses menuju ke keadaan setimbang (equilibrium state). Presipitasi ini terjadi melalui proses nukleasi dan pertumbuhan dari keadaan setelah quench hingga keadaan akhir dimana kesetimbangan telah tercapai.

Upaya untuk lebih meningkatkan lagi kemampuan dan sifat-sifat dari paduan ini telah banyak dilakukan oleh para peneliti. Beberapa penelitian telah dilakukan berkaitan dengan peningkatan sifat dan rekayasa aging dari paduan aluminium diantaranya adalah oleh Zaiji Zhan [1]



yang meneliti tentang peningkatan sifat mekanik dengan kombinasi solution treatment dan ion implantasi. S.D. Liu (2006) meneliti tentang pengaruh proses aging terhadap sensitivitas quens dari paduan aluminium 7075. Oleh Badini [2] penelitian tentang natural aging paduan aluminium 6061 yang diperkuat dengan partikel dan whisker SiC.

Kajian lainnya dilakukan oleh Son [3] tentang perilaku presipitasi dari paduan Al-Cu selama proses aging isothermal pada temperatur rendah. Bin-lung Ou (2005) juga meneliti tentang dampak dari perlakuan pre-aging terhadap sifat tarik dan bending dari paduan aluminium AA 6061. Sementara itu Jerry H Sokolowski (2001) melakukan kajian peningkatan durabilitas paduan aluminium 319 dengan perlakuan larutan (solution treatment) pada temperatur tinggi.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan penguatan aging pada paduan aluminium, belum terdapat informasi yang memadai tentang karakteristik deformasi akibat beban impact dari mikrostruktur transisi paduan AA2024. Dengan melakukan penelitian tentang karakteristik deformasi akibat beban impact pada mikrostruktur transisi dari AA2024 maka akan dapat diketahui mikrostruktur transisi yang memiliki ketahanan yang paling baik dalam merespon beban impact yang diberikan. Pengetahuan akan ketahanan impact tertinggi pada mikrostruktur transisi akan dapat digunakan dalam merekayasa dan mengkombinasikan dengan jenis penguat lainnya yang dapat digunakan untuk dijadikan sebagai matrik aluminium untuk aplikasi ketahanan impact.

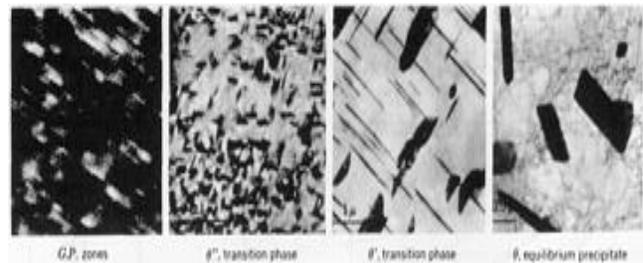
II. Kajian Pustaka

II.1 Mekanisme Penguatan Presipitasi

Kekuatan paduan penguatan-penuaan ditentukan oleh interaksi antara dislokasi yang bergerak dengan partikel presipitat. Hambatan pada paduan penguatan presipitasi yang menghalangi pergerakan dislokasi dapat berwujud regangan disekeliling zona GP, zona atau presipitasi itu sendiri atau gabungan keduanya [4]. Sedikitnya terdapat tiga penyebab penguatan

yaitu mekanisme penguatan regangan koherensi, mekanisme penguatan kimia dan mekanisme penguatan dispersi.

Pada awal pertumbuhan partikel (partikel-kecil), presipitat bersifat koheren dan mampu deformasi ketika dislokasi memotongnya sedangkan pada partikel dengan ukuran besar maka partikel bersifat inkoheren dan non-mampu deformasi ketika dislokasi melewatinya. Untuk partikel mampu deformasi, ketika deformasi melewati partikel maka sifat intrinsik partikel menjadi penting dimana variasi kekuatan paduan akibat ukuran partikel hanya sedikit. Sebaliknya untuk partikel yang inkoheren ketika dislokasi melewatinya, kekuatan paduan tidak bergantung pada sifat intrinsik partikel tetapi sangat bergantung pada ukuran partikel presipitat [4].



Gambar 1. Mikrostruktur Transisi dari paduan Al-Cu pada setiap tahapan aging

Transisi deformasi dari deformasi yang dikendalikan oleh partikel koheren ke partikel inkoheren dapat dilihat dari perubahan pada mikrostruktur, karena deformasi yang dikendalikan oleh partikel koheren terjadi aliran dislokasi yang tidak terganggu dan dihasilkan aliran plastis “laminar”. Sedangkan untuk kasus partikel inkoheren menghasilkan aliran plastis turbulen [4]. Besarnya tegangan geser yang terjadi pada kasus penguatan partikel bergantung pada kemampuan dislokasi untuk melengkung dan melewati partikel. Untuk partikel koheren tegangan geser yang dibutuhkan adalah [4]:

$$\tau = 4.1 \mu \epsilon^{3/2} f^{1/2} \left(\frac{r}{b} \right)^{1/2} \quad (1)$$

sedangkan untuk partikel inkoheren besarnya tegangan geser dapat diperoleh dari persamaan [4]:



$$\tau = 0.7 \mu f^{1/2} (\epsilon \cdot b^3 r^3)^{1/4} \tag{2}$$

dimana: μ adalah modulus geser, ϵ adalah ketidakcocokan partikel dan f adalah fraksi volume dari presipitat dan b adalah jarak pergeseran.

Sedangkan besar kerja yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi diperoleh dari persamaan:

$$dW = \tau \cdot dA \cdot b \tag{3}$$

Besar gaya dislokasi yang dibutuhkan per unit panjang dislokasi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$F_d = \tau \cdot b \tag{4}$$

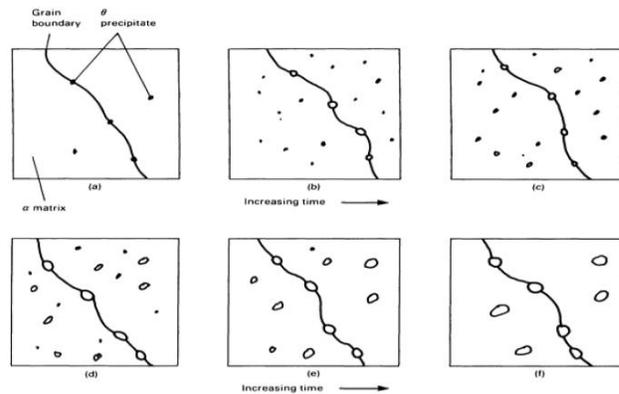
Dalam terminologi dislokasi, kekuatan logam dengan penguatan partikel diperoleh dari pembangkitan dan mobilisasi dislokasi. Peningkatan kekuatan dari paduan dengan penguatan presipitasi dapat ditinjau sebagai interaksi antara presipitasi dan pergerakan dislokasi. Interaksi yang terjadi sangat kompleks namun beberapa peneliti mengusulkan model interaksi tersebut.

Interaksi dislokasi dengan partikel presipitat akan meningkatkan tegangan geser yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi tersebut.

II.2 Perubahan struktur Paduan Al-Cu selama Proses Aging

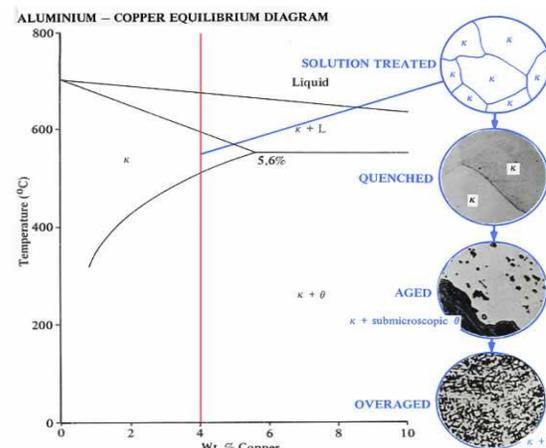
Paduan aluminium-tembaga memiliki kemampuan untuk dikeraskan dengan penuaan (*age-hardened*), selama proses penuaan terjadi beberapa kali transformasi mikrostruktur dari keadaan tidak seimbang yaitu terbentuknya struktur yang disebut zona GP yang sifatnya koheren dengan matriks menuju keadaan kesetimbangan dengan hadirnya endapan partikel fasa kedua dengan sifat inkoheren.

Secara berurutan transformasi struktur tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Ilustrasi inisiasi dan pertumbuhan endapan yang terjadi pada penguatan presipitasi

Pada awal penuaan (*aging*) sistem Al-Cu akan membentuk struktur transisi yang disebut zona GP (1) zona ini mirip-pelat yang kaya akan atom terlarut pada bidang $[1\ 0\ 0]_{Al}$. Zona ini terdiri atas kluster atom tembaga yang mirip pelat yang bersegregasi pada bidang $[100]$ dari matriks aluminium. Pada gambar dibawah ini terdapat pola hamburan sinar-X dari mikrofotografi elektron transmisi pada lembaran tipis aluminium dengan kadar tembaga 4% yang memperlihatkan tebal pelat yang terbentuk dengan panjang sekitar 10 nm.



Gambar 3. Ilustrasi Perubahan mikrostruktur selama tahapan aging Al-Cu

Selanjutnya zona GP (1) ini setelah melewati waktu aging tertentu kemudian membentuk struktur transisi kedua yang disebut zona GP (2) yang memiliki struktur lebih tertata dibanding zona GP (1). GP (2) adalah presipitat intermediet koheren dan bukan suatu zona, karena memiliki struktur kristal tetap sehingga kadang disebut fasa

θ'' . Presipitat ini memiliki tebal maksimum 10 nm dan memiliki diameter hingga 150 nm, dengan struktur tetragonal yang cocok dengan sel satuan aluminium pada arah a dan b tetapi tidak pada arah c. Karena ukurannya, presipitat fasa θ'' mudah diobservasi dengan menggunakan mikroskop elektron. Struktur transisi berikutnya adalah fasa θ' dengan struktur tetragonal dengan dimensi sel satuan a = 0.404 dan c = 0.58 nm dan sumbunya sejajar dengan arah [1 0 0]_{Al}. Fasa θ' adalah fasa dengan sifat inkoheren. Pada akhir struktur transisi terbentuk fasa kesetimbangan θ -CuAl₂ dengan struktur tetragonal dengan a = 0.606 dan c = 0.487 nm. Presipitat kesetimbangan ini memiliki derajat inkoheren yang lebih tinggi dengan matriks aluminium dan pembentukannya selalu mengakibatkan pelunakan yang disebabkan hilangnya regangan koherensi [4].

Beban impact adalah salah satu jenis pembebanan yang digunakan pada proses perubahan bentuk dari logam. Pada metode beban impact benda kerja ditekan diantara dua cetakan sehingga terjadi perubahan bentuk pada benda kerja. Beban impact banyak diaplikasikan pada proses hammer forging dimana menggunakan palu daya yang dipercepat dengan uap untuk menghasilkan laju pembebanan yang tinggi.

III. Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan dengan metode eksperimen, spesimen uji adalah bahan paduan Aluminium jenis 2024 dengan kandungan tembaga sebesar 4.53 % berdasarkan hasil uji komposisi yang dilakukan. Spesimen berbentuk silinder pelat dengan variasi diameter 5 mm, 8 mm, 10 mm dan 12 mm dengan ketebalan konstan 2 mm. Semua spesimen mengalami proses solution treatment pada temperatur 550 °C dan dihomogenisasi dalam tungku selama 1.5 jam. Selanjutnya spesimen diquench pada media pendingin air dan kemudian dilakukan proses aging pada temperatur ruang. Pengujian deformasi dengan beban impact dilakukan pada masing-masing spesimen dengan waktu aging 0.1 hari (mikrostruktur transisi 1), 1 hari (mikrostruktur transisi 2), 10 hari (mikrostruktur transisi 3) dan 100 hari (mikrostruktur transisi 4). Pengujian Impact

dilakukan dengan menumbukkan beban sebesar 8 kg pada ketinggian 1.5 meter. Pengukuran deformasi dilakukan dengan mengukur perubahan dimensi dan bentuk setelah penumbukan. Perubahan dimensi yang diukur adalah diameter dan ketebalan. Pengujian kekerasan juga dilakukan pada spesimen uji setelah dilakukan pengujian impact.

IV. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1 dibawah ini memperlihatkan hasil uji komposisi yang telah dilakukan. Dari tabel terlihat besar kandungan unsur tembaga sebanyak 4.53%. dari hasil uji komposisi tersebut maka spesimen masuk dalam kelompok jenis paduan Al-2024. Paduan Al-2024 adalah jenis paduan yang heat treatable, yaitu paduan yang dapat ditingkatkan sifat mekaniknya dengan perlakuan panas. Peningkatan sifat mekanik diperoleh melalui pertumbuhan partikel endapan (presipitat) selama proses perlakuan panas [4]. Partikel endapan yang muncul pada saat perlakuan panas penuaan (*aging*) mengalami proses pertumbuhan endapan seiring dengan berjalannya waktu aging [5].

Tabel 1. Hasil uji Komposisi

| Kode Sampel Sample Code | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%) | Zn (%) |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Al2024 | 0.116 | 0.203 | 4.53 | 0.750 | 7.07 | 0.124 |
| | Cr (%) | Ni (%) | Ti (%) | Pb (%) | Sn (%) | Al (%) |
| | 0.025 | <0.005** | 0.027 | <0.002** | <0.010** | 87.0 |

Gambar 4 dibawah ini memperlihatkan kurva hasil perubahan ketebalan terhadap spesimen akibat pembebanan impact yang diberikan. Besar perubahan ketebalan maksimum terjadi pada awal-awal proses perlakuan panas dan kemudian mengalami penurunan. Pada awal pertumbuhan partikel (partikel-kecil), presipitat bersifat koheren dan mampu deformasi ketika dislokasi memotongnya sehingga beban yang diberikan menyebabkan terjadinya pergerakan dislokasi pada seluruh struktur material [2]. Dengan terjadinya pergerakan dislokasi sebagai kompensasi pemberian beban maka terjadi perubahan ketebalan atau deformasi yang cukup besar pada awal-awal proses aging. Kemampuan pergerakan dislokasi tersebut karena partikel endapan yang hadir pada awal proses aging masih



memiliki ukuran yang sangat kecil sehingga mikrostruktur masih bersifat koheren. Untuk partikel mampu deformasi, ketika deformasi melewati partikel maka sifat intrinsik partikel menjadi penting dimana variasi kekuatan paduan akibat ukuran partikel hanya sedikit [4].



Gambar 4. Kurva perubahan ketebalan dari masing-masing struktur transisi pada setiap waktu aging.

Sedangkan dengan lamanya waktu aging, partikel mengalami pertumbuhan dan semakin besar. Dengan ukuran yang besar maka partikel bersifat inkoheren dan non-mampu deformasi ketika dislokasi melewatinya. Hal inilah yang menjadi penyebab turunnya perubahan ketebalan yang terjadi pada spesimen uji dengan waktu aging yang lebih lama. Untuk partikel yang inkoheren ketika dislokasi melewatinya, kekuatan paduan tidak bergantung pada sifat intrinsik partikel tetapi sangat bergantung pada ukuran partikel presipitat [4].

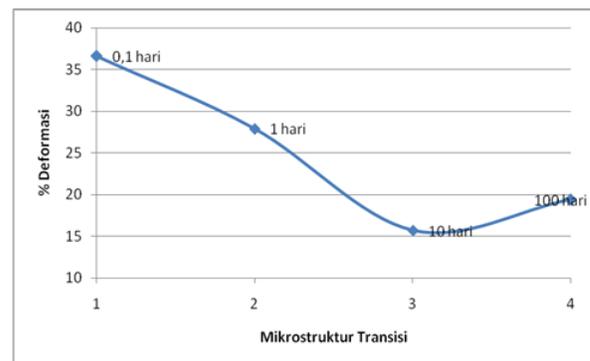


Gambar 5. Kurva perubahan diameter dari masing-masing struktur transisi pada setiap waktu aging.

Gambar 5 memperlihatkan kurva perubahan diameter dari masing-masing struktur tansisi pada setiap waktu aging. Seperti halnya pada perubahan ketebalan yang mengalami deformasi

tebal yang cukup besar pada awal proses aging demikian pula dengan perubahan diameter. Besarnya perubahan diameter tidak lain akibat besarnya perubahan ketebalan yang dialami oleh spesimen. Hal ini sesuai dengan hubungan volume konstan pada pembentukan logam dimana volume sebelum dan setelah proses pembentukan adalah konstan. Son menuliskan bahwa paduan Al-2024 mengalami empat tahapan perubahan mikrostruktur selama proses aging yaitu fasa GP zone, fasa θ'' , fasa θ' dan fasa θ . Tiga fasa awal adalah fasa pada kondisi ketidakseimbangan dan fasa keempat adalah fasa dimana sudah tercapai kondisi kesetimbangan dimana tidak terjadi lagi pertumbuhan endapan [3].

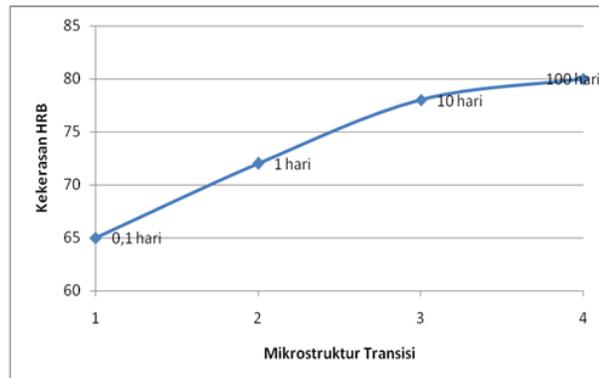
Gambar 6 memperlihatkan kurva hubungan antara persentasi deformasi dengan waktu aging yang mewakili mikrostruktur transisi. Dari kurva terlihat besar deformasi pada awal proses aging mencapai 36 % hal ini berarti bahwa pemberian beban impact menyebabkan besarnya perubahan bentuk pada spesimen uji. Pada awal pertumbuhan endapan dimana mikrostruktur masih bersifat koheren dengan matriksnya menyebabkan mikrostruktur transisi yang terjadi pada waktu aging tersebut bersifat mampu deformasi. Zheng menemukan juga bahwa dengan pemberian deformasi maka mempercepat proses aging yang terjadi dan dari hasil uji tarik yang dilakukannya juga terlihat bahwa pemberian deformasi selama proses aging meningkatkan kekuatan tarik dari bahan [5].



Gambar 6. Kurva perubahan persentasi deformasi dari masing-masing struktur transisi pada setiap waktu aging.

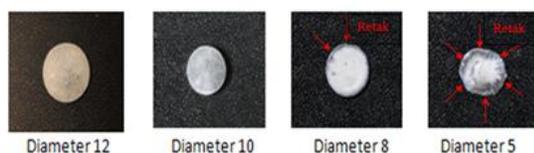
Dari Gambar 6 juga terlihat bahwa setelah waktu aging ketiga yaitu pada tahapan keempat dengan waktu aging 100 hari terjadi peningkatan

deformasi. Peningkatan deformasi yang terjadi disebabkan oleh partikel endapan (presipitat) pada tahapan tersebut tidak mampu mempertahankan ketahanan bahan terhadap pergerakan dislokasi sehingga mengalami peningkatan deformasi. Ketidakmampuan partikel endapan untuk mempertahankan penguncian dislokasi disebabkan ukuran partikel endapan yang semakin besar sehingga telah melewati ukuran kritis dari presipitat untuk berlaku optimal dalam mengunci dislokasi [4].



Gambar 7. Kurva nilai kekerasan spesimen dari masing-masing struktur transisi pada setiap waktu aging.

Gambar 7 diatas memperlihatkan kurva nilai kekerasan dari setiap waktu aging. Dari gambar terlihat terjadi peningkatan kekerasan dengan lamanya waktu aging. Hasil yang diperoleh ini sejalan dengan kurva-kurva sebelumnya. Dengan terjadinya peningkatan kekerasan maka kemampuan bahan untuk terdeformasi juga mengalami penurunan. Proses perlakuan panas dan efek presipitasi yang ditimbulkan terhadap kekerasan bahan adalah fungsi dari waktu dan temperatur pemanasan. Dari hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa waktu aging berperan sangat penting terhadap proses pengerasan presipitasi dimana diperoleh bahwa untuk memperoleh kekerasan maksimum maka waktu aging optimum terjadi pada rentang 10-100 hari [6].



Gambar 8. Foto spesimen setelah mengalami pembebanan impact.

Gambar 8 memperlihatkan foto perubahan bentuk dari spesimen setelah pembebanan impact untuk masing-masing diameter. Dari foto yang terlihat bahwa semakin kecil diameter spesimen uji semakin besar perubahan bentuk yang terjadi bahkan terlihat adanya retak pada bagian tepi spesimen.

V. Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan tentang karakteristik deformasi akibat beban impact pada mikrostruktur transisi paduan Al-2024 diperoleh bahwa:

1. Terjadi penurunan perubahan ketebalan dengan lamanya waktu aging demikian pula dengan penurunan perubahan diameter pada spesimen uji
2. Pada tahapan mikrostruktur awal yaitu pada awal-awal waktu aging spesimen mengalami deformasi yang besar akibat beban impact yang diberikan yang disebabkan oleh sifat koheren mikrostruktur yang mampu deformasi.
3. Lamanya waktu aging berpengaruh signifikan terhadap perubahan deformasi dan nilai kekerasan yang terjadi. Semakin tinggi kekerasan spesimen maka semakin rendah derajat atau tingkat deformasi yang terjadi.
4. Perubahan bentuk terbesar terjadi pada spesimen dengan ukuran diameter 5 mm bahkan terjadi retak pada bagian tepi akibat pembebanan yang diberikan.

Kepustakaan

- [1] Zaiji Zhan, et al, "The mechanical properties of an aluminum alloy by plasma-based ion implantation and solution-aging treatment", *Surface and Coatings Technology*, 2000.
- [2] C. Badini, et al, "Natural aging characteristics of aluminum alloy 6061 reinforced with SiC whiskers and particles", *Materials Science and Engineering*, A 136, 99-107, 1991.
- [3] S. K. Son et al, "Precipitation behavior of an Al-Cu alloy during isothermal aging at low temperatures", *Materials Letters* 59 (2005) 629- 632, 2004.
- [4] R. E. Smallman., Sriati Djaprie, *Metalurgi Fisik Modern* (Terjemahan), Edisi keempat, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1991.
- [5] Zheng Kai-yu, "Effect of pre-deformation on aging characteristics and mechanical properties of Mg-Gd-Nd-Zr alloy", *Trans. Nonferrous Met. SOC. China* 1164-1168, 2007
- [6] A. R. Eivani, "Modeling age hardening kinetics of an Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy", *Journal of materials processing technology* 205 (2008) 388-393, 2007.