

Studi mikrostruktur dan sifat mekanik Aluminium 6061 melalui proses canai dingin dan *aging*

Mirawati Dewi¹, Dr.Eng., A. Ali Alhamidi, S.T., M.T., M. Fitrullah, S.T., M.T

Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon-Banten, Indonesia

¹Email: mirawatidewi33@gmail.com

Abstrak

Al 6061 memiliki sifat mekanik yang unggul antara lain bobot ringan, mampu las baik, ketahanan korosi baik serta harga yang murah, tetapi memiliki kelemahan dalam hal kekuatannya. Untuk dapat memenuhi kriteria sebagai komponen pesawat terbang, Al 6061 harus ditingkatkan kekuatannya. Salah satu metode efektif untuk meningkatkan kekuatan adalah dengan canai dingin dan *aging*, sehingga memenuhi kriteria sebagai komponen pesawat, dalam hal ini bagian yang cocok adalah *skin* sayap pesawat terbang. Al 6061 dilakukan proses canai dingin dengan reduksi 50%, 60%, dan 70% kemudian dilanjutkan dengan *aging* pada temperatur 200°C selama 1800, 3600, 5400, 7200 dan 10.800 detik. Sifat mekanik dan mikrostruktur setelah proses canai dingin dan *aging* dipelajari. Perubahan morfologi mikrostruktur terjadi pada Al 6061, dari mulai *as-received*, setelah proses canai dingin dan setelah *aging*. Aluminium 6061 setelah proses canai dingin menghasilkan *elongated grains*, semakin pipih pada reduksi tertinggi 70%, dan mikrostruktur berubah menjadi *equiaxial* setelah proses *aging*. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan *peak* fasa Mg₂Si dan Al₂FeSi pada Al 6061 hasil canai dingin dan *aging*. Fasa Mg₂Si dan Al₂FeSi merupakan fasa kedua (presipitat) pada Al 6061. Sifat mekanik diukur dengan uji kekerasan *Brinell* dan ketahanan aus. Kekerasan dan ketahanan ausnya meningkat. Nilai kekerasan tertinggi dicapai pada sampel dengan reduksi 70% dengan waktu *aging* 5400 detik yaitu sebesar 121 HBN dari nilai kekerasan *as-received* sebesar 65 HBN. Ketahanan aus meningkat dari semula $6,209951 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ pada kondisi *as-received* menjadi $4,775436 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ setelah *aging*. Peningkatan sifat mekanik ini disebabkan oleh *strain hardening* akibat proses canai dingin dan fasa kedua (presipitat) yang dihasilkan setelah *aging*. Di sisi lain, fasa kedua (presipitat) berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi, sehingga menyebabkan meningkatnya sifat mekanik.

Kata kunci: canai, *aging*, fasa kedua, *strain hardening*, dislokasi

Abstract

Al 6061 has excellent properties there are light weight, good weldability, excellent corrosion resistance and low price, but weak in strength. In order to achieve qualification for aircraft's component, the strength must be improved. One of effective methode to improve mechanical properties there are cold rolling and aging, so Al 6061 will achieves qualification for aircraft's component, especially for aircraft wing skin. Al 6061 was processed by cold rolling with reduction of 50%, 60% and 70% in thickness then aged at 200°C for 1800, 3600, 5400, 7200 and 10.800 sec. Microstructural and mechanical properties was studied. Microstructural morphology changes in Al 6061 include as received, as rolled and after aging. Al 6061 as received has equiaxial grains, microstructure changed after processed by cold rolling become elongated grains, most length in peak reduction and back into equiaxial grains after aging. *X-Ray Diffraction* (XRD) analysis showed peaks Mg₂Si and Al₂FeSi phases in Al 6061 after cold rolled and aging. Mg₂Si and Al₂Fesi phases are second phase in Al 6061. Mechanical properties was measurement using *Brinell* hardness and wear resistance testing. The hardness and wear resistance increased with significant. Peak hardness achieve 121 HBN at sample with reduction 70% in thickness for 5400 second of aging from Al as received about 65 HBN. The wear resistane increased from as received about $6,209951 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ become $4,775436 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ after aging. The improvement of mechanical properties caused by strain hardening after cold rolling and presence of second phases in Al 6061 after aging. Strain hardening improves

density of dislocation and results high lattice strain. On the other hand, the presence of second phases are function as obstacle for dislocation movement. So, their affect to improve mechanical properties of Al 6061.

Keywords: rolling, aging, second phase, strain hardening, dislocation

1. PENDAHULUAN

Aluminium telah digunakan secara luas untuk komponen yang membutuhkan bobot ringan dan ketahanan korosi baik, termasuk dalam komponen industri pesawat terbang. Aluminium telah menjadi material pilihan untuk industri pesawat terbang sejak 1930^[1]. Umumnya, industri pesawat terbang menggunakan Al seri 2xxx dan 7xxx sebagai material untuk kompoen pesawat terbang. Namun sejak Al 6061 menjadi semakin luas aplikasinya dengan banyak keunggulan yang dimiliki seperti mampu bentuk baik, ketahanan korosi baik, mampu las baik, dan harga yang murah, Al 6061 menjadi sebuah alternatif material untuk komponen pesawat terbang, dalam hal ini bagian yang cocok adalah *skin* pesawat terbang^[1,2,3]. Tetapi, kelemahan dari Al 6061 dibandingkan dengan Al seri 2xxx dan 7xxx adalah kekuatan yang jauh lebih rendah. Untuk itu, diperlukan prosedur untuk meningkatkan sifat mekanik Al 6061. Dalam rangka mencapai sifat mekanik maksimum, dibutuhkan prosedur perlakuan panas yang cocok. Salah satu metode yang efektif adalah dengan proses canai dingin dan *aging*.

Heat treatment adalah salah satu metode alternatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanpa proses *alloying* (pemaduan). Dalam penelitian ini, *heat treatment* yang digunakan adalah canai dingin dan *aging*. Proses canai dingin menyebabkan deformasi pada material yang ditandai dengan berkurangnya ketebalan material. Ketika proses deformasi, terjadi pergerakan dislokasi pada internal material. Konsentrasi dislokasi menjadi semakin tinggi, maka sifat mekanik akan meningkat. Berbeda dengan proses canai dingin, penguatan material melalui proses *aging*, dihasilkan melalui penguatan presipitasi. Mg₂Si adalah presipitat yang terbentuk pada Al 6061 setelah *aging*. Presipitat ini berperan dalam menghalangi pergerakan dislokasi, sehingga akan meningkatkan sifat mekaniknya. Ketika canai dingin dikombinasikan dengan *aging*, keduanya akan saling melengkapi satu sama lain.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh proses canai dingin dan *aging* terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik Al 6061. Meskipun proses canai dingin dan *aging* pada Al 6061 telah banyak diteliti sebelumnya, pemahaman tentang kedua proses ini masih belum lengkap karena komposisi, proses dan parameter yang digunakan berpengaruh terhadap hasil yang didapatkan.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Material yang digunakan (*as received*) adalah Al 6061 komersil berbentuk lembaran dengan dimensi p x l x t = 50 mm x 15 mm x 10 mm. Tabel 1. Menunjukkan komposisi kimia Al 6061 *as received*.

Tabel 1. Komposisi kimia Aluminium 6061

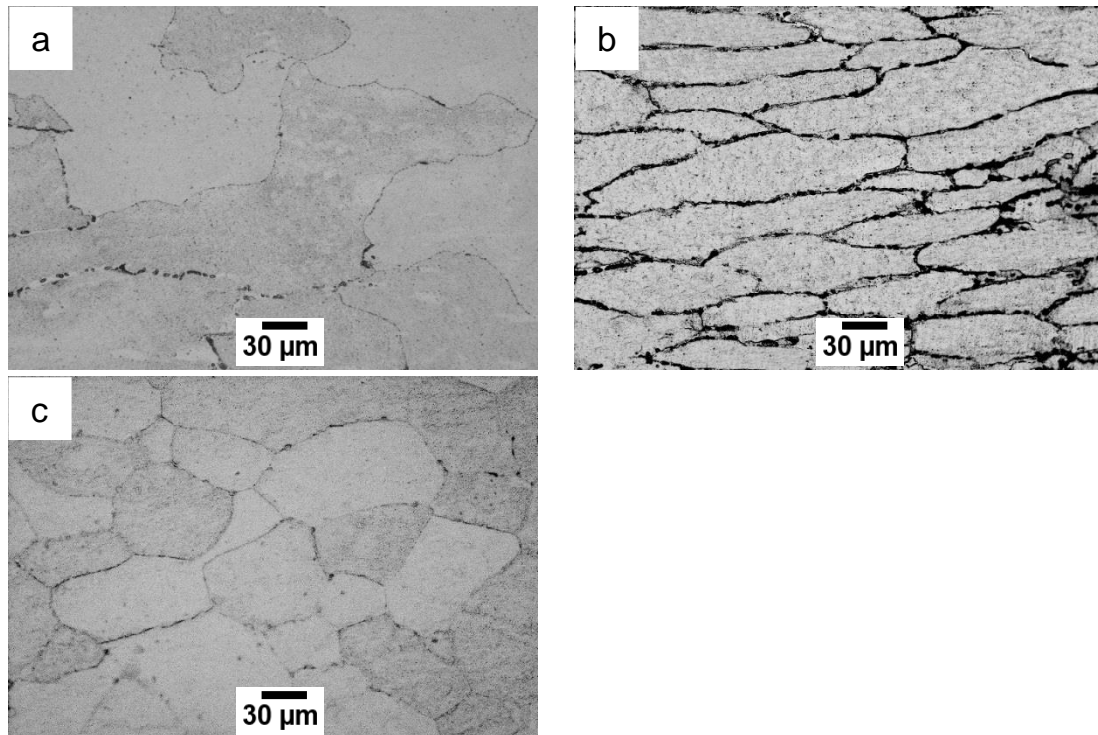
Si	Mg	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Unsur lain	Al
0,63	0,98	0,19	0,18	0,05	0,10	0,08	0,15	Balance

Karakterisasi sampel dilakukan dengan pengamatan metalografi, analisa *X-ray Diffraction* (XRD), uji kekerasan dan ketahanan aus. Pengamatan metalografi dilakukan dengan mikroskop optik tipe *Olympus BX51M*. Sebelum dilakukan pengamatan, dilakukan preparasi material dengan tahapan *grinding*, *polishing* dan *etching* (etsa). *Grinding* dilakukan dengan mesin *grinding* dan kertas ampelas (*Silicon carbide*) dimulai dengan 320 *grit*, 500 *grit*, 600 *grit*, 800 *grit*, 1000 *grit*, dan 1200 *grit* dengan kecepatan *grinding* 240 rpm selama 1-2 menit. Tahap selanjutnya adalah *polishing*, dilakukan dengan mesin *polishing* menggunakan *diamond spray* 1 mikron. Tahap terakhir adalah etsa, dilakukan menggunakan etsa *Keller Reagent* dengan komposisi larutan terdiri dari 25 ml akuades, 5 ml HF, 7,5 ml HCl dan 12,5 HNO₃. Material dicelupkan selama 50-60 detik. Kemudian pengamatan dilakukan dengan mikroskop optik. Analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan menggunakan gelombang anoda Cu. Uji kekerasan *Brinell* dilakukan menggunakan indentor bola baja berdiameter 2,5 mm dan beban 62,5 kg. Waktu yang dibutuhkan untuk pengujian setiap titik adalah 1 menit 17 detik. Uji ketahanan aus dengan mesin uji *Ogoshi Tokyo Wear Testing Machine* dengan mengacu pada standar ASTM G99. Kemudian sampel dilakukan *solution treatment* selama 3600 detik pada temperatur 530°C dan dilakukan *quenching* air es. Setelah dilakukan *solution treatment*, sampel harus disimpan dalam *freezer* untuk membuatnya tetap dingin sehingga mencegah terjadinya natural *aging*. Setelah itu, sampel dilakukan canai dingin dengan reduksi ketebalan 50%, 60% dan 70%

dengan mesin canai skala laboratorium. Sampel hasil proses canai dilakukan proses *aging* di dalam *muffle furnace* pada temperatur 200°C dengan waktu 1800, 3600, 5400 dan 10.800 detik, kemudian didinginkan diudara.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1. Menunjukkan mikrostruktur Al 6061: (a) *as received*, (b) setelah canai dingin, (c) setelah canai dingin dan *aging*.

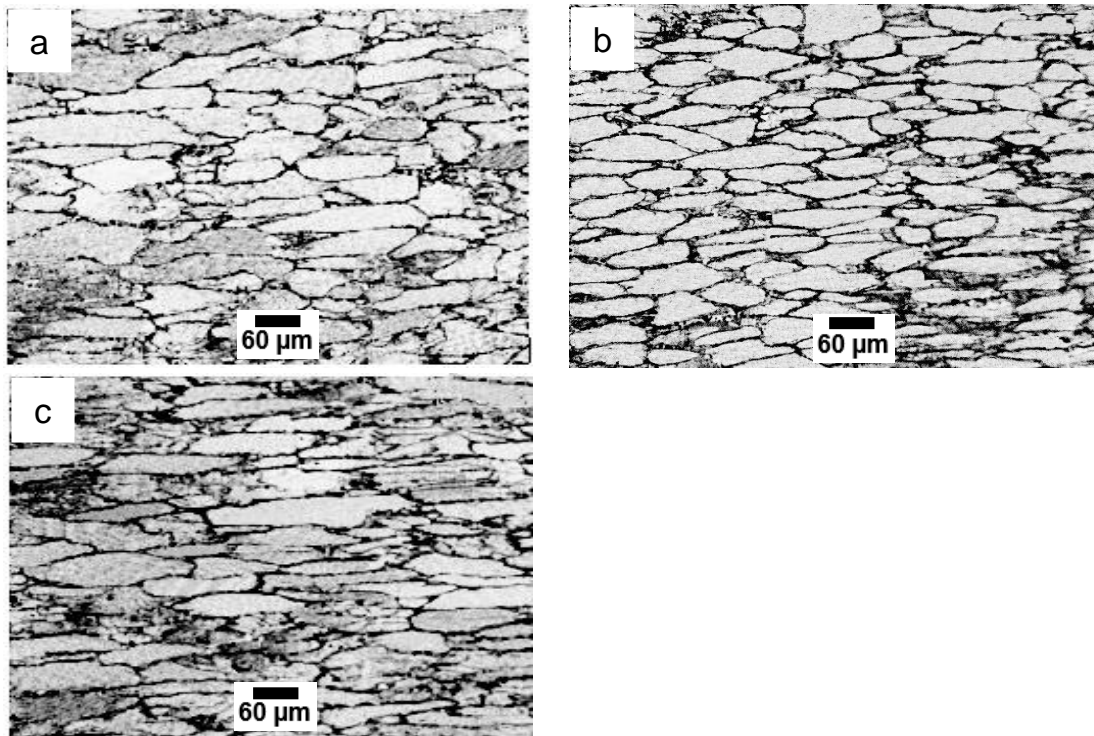


Gambar 1. Mikrostruktur paduan Al-6061 pada kondisi (a) *as received*, (b) setelah canai, (c) setelah *aging*

Mikrostruktur Al 6061 berbentuk *equiaxial* pada kondisi *as-received*, kemudian berubah menjadi pipih setelah proses canai dan kembali menjadi *equiaxial* setelah proses *aging*. Pada dasarnya, tidak terjadi penghalusan ukuran butir. Butir hasil canai dingin hanya terelongasi menjadi bentuk yang lebih pipih dan memanjang ke arah proses canai dan setelah proses *aging*, butir berubah bentuk menjadi *equiaxial*.

Gambar 2. Menunjukkan mikrostruktur Al 6061 setelah canai dingin untuk reduksi ketebalan: (a) 50%, (b) 60%, dan (c) 70%. Butir hasil proses canai menunjukkan *elongated grain* dan paling pipih pada reduksi ketebalan 70%. Berubahnya bentuk butir setelah canai dingin ini akibat deformasi yang hebat sehingga mengubah bentuk butiran material dan secara kasat mata terlihat berkurangnya ketebalan material. Butiran semakin pipih dengan kenaikan % reduksi. Hal ini juga akan berdampak pada sifat mekanik yang dihasilkan.

Gambar 3. Menunjukkan hasil analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) Al 6061 hasil proses canai dingin dan *aging* untuk reduksi: (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, dengan masing-masing waktu *aging* 1800, 3600, dan 5400 detik termasuk sampel *as-solution treatment*. Hasil tersebut menunjukkan terdapat tiga fasa pada Al 6061 setelah proses canai dan *aging* dan *single phase* pada Al 6061 *as solution*. Fasa-fasa tersebut antara lain Al, Mg₂Si, dan Al₂FeSi. Fasa Mg₂Si dan Al₂Fesi disebut sebagai fasa kedua pada Al 6061. Namun, fasa kedua tersebut hadir dalam intensitas *peak* yang sangat rendah, sehingga pada gambar tidak terlihat *peak* tersebut. Oleh karena itu, dilakukan pembesaran gambar untuk *peak* fasa kedua tersebut yang ditunjukkan oleh anak panah seperti yang terlihat pada Gambar 3. Sedangkan untuk Al 6061 *as solution*, hanya ditemukan *single phase*, yaitu Al. seperti yang diketahui, bahwa tujuan proses *solution treatment* pada Al 6061 sebelum proses canai dan *aging* adalah untuk menyetarakan fasa yang terdapat pada sampel dengan melarutkan seluruh fasa keduanya, sehingga hanya ditemukan *single phase* Al.

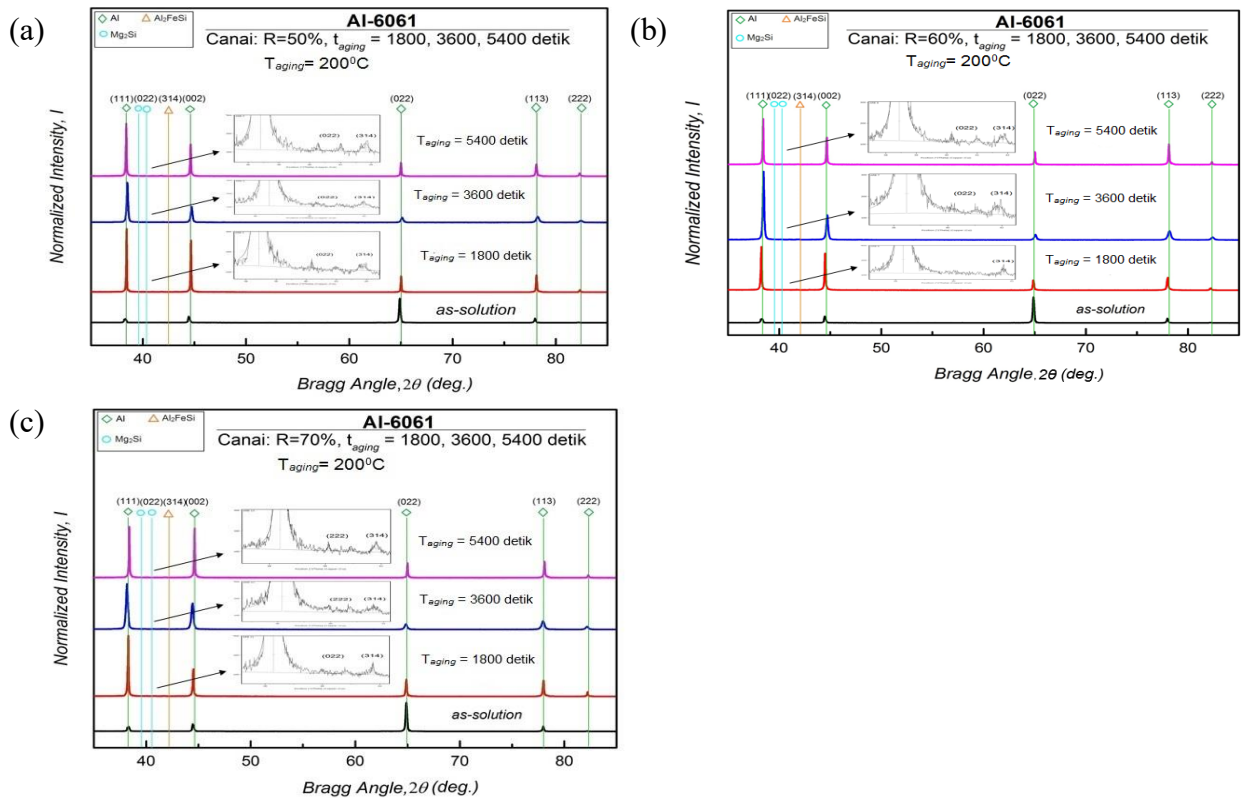


Gambar 2. Mikrostruktur Al-6061 setelah proses canai (a) reduksi 50%, (b) reduksi 60%, (c) reduksi 70%

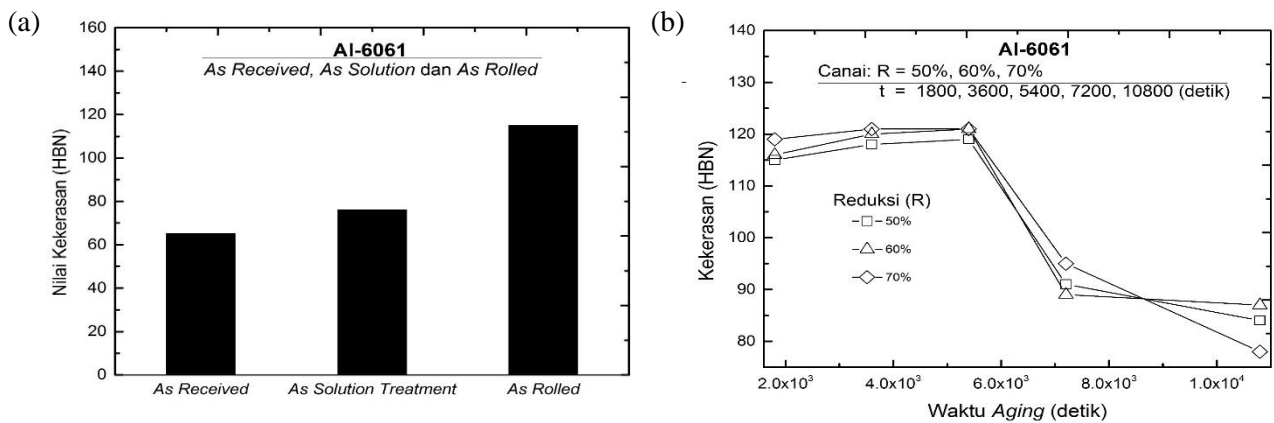
Fasa kedua ini hadir baik pada Al 6061 canai reduksi 50%, 60% atau 70%. Secara keseluruhan, fasa kedua ini ditemukan pada semua sampel dengan bidang kisi yang sama. Baik pada reduksi 50%, 60% atau 70%, jika ditinjau perbedaan dari waktu *aging*, tidak terlihat perbedaan intensitas *peak* yang signifikan. Kecuali pada reduksi 60% pada waktu *aging* 1800 detik, *peak* fasa kedua Mg_2Si tidak muncul (Gambar 2b) dan baru muncul pada waktu *aging* 3600 detik dan 5400 detik.

Gambar 4 menunjukkan grafik nilai kekerasan untuk Al 6061: (a) *as received*, *as solution treatment*, dan *as rolled* (setelah canai dingin); (b) setelah canai dingin dan *aging*. Grafik pada Gambar 4a menunjukkan terjadi kenaikan yang konsisten dari sampel Al 6061 *as received*, *as solution* dan *as rolled*. Nilai kekerasan untuk Al 6061 *as received*, *as solution treatment* dan *as rolled* (setelah canai) berturut-turut yaitu 65 HBN, 76 HBN dan 115 HBN. Meningkatnya nilai kekerasan setelah canai dingin, menyebabkan terjadinya distorsi kisi^[3,4]. Selain itu, juga terjadi penumpukan dislokasi, dengan tingginya penumpukan dislokasi, maka dibutuhkan tegangan luar yang lebih besar lagi untuk mendeformasi Al selanjutnya. Hal-hal tersebut yang menyebabkan terjadinya peningkatan sifat mekanik Al 6061 setelah canai dingin. Hal ini juga dinyatakan oleh penelitian-penelitian yang sebelumnya dilakukan pada Al 5083^[5], Al 6061^[6] dan komposit AA1050/AA6061^[7].

Grafik pada Gambar 4b menunjukkan data nilai kekerasan Al 6061 setelah proses canai dingin dan *aging*. Berbeda dengan grafik pada Gambar 4a, pada grafik ini tidak terdapat kenaikan nilai kekerasan yang signifikan setelah proses canai dingin. Peningkatan nilai kekerasan Al 6061 setelah *aging* disebabkan oleh hadirnya fasa kedua. Hal ini sesuai dengan hasil analisa XRD yang telah dilakukan. Analisa XRD menunjukkan bahwa terdapat fasa lain selain Al yaitu Mg_2Si dan Al_2FeSi . Fasa ini diidentifikasi sebagai fasa kedua dan secara teori, Mg_2Si adalah presipitat yang terbentuk dari Al 6061 hasil proses *aging*. Presipitat berperan dalam meningkatkan sifat mekanik Al 6061 dengan cara menghalangi pergerakan dislokasi pada Al saat dikenakan deformasi. Oleh karena itu, Al akan menjadi semakin kuat^[1, 3, 8, 9, 10, 11]. Namun, pada penelitian ini, nilai kekerasan tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan. Kemungkinan terjadi karena kurang efektifnya proses *aging* pada Al 6061 yang mengakibatkan presipitat tidak menyebar merata pada Al 6061 atau disebabkan oleh ukuran presipitat yang besar. Dalam penelitian ini, tidak dapat mengetahui karakteristik presipitatnya karena pengamatan dengan mikroskop optik tidak dapat mengamati presipitat. Presipitat akan terlihat bila menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) seperti yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya pada Al 6061^[4,12,13].



Gambar 3. Hasil analisa *X-Ray Diffraction (XRD)* paduan Al-6061 setelah proses canai dingin untuk reduksi: (a) 50%, (b) 60%, dan (c) 70%, dengan masing-masing waktu *aging* 1800 (a), 3600 (b), dan 5400 detik termasuk sampel *as-solution treatment*



Gambar 4. Nilai kekerasan untuk Al 6061: (a) *as received*, *as solution treatment*, dan *as rolled* (setelah canai dingin); (b) setelah canai dingin dan *aging*.

Nilai kekerasan meningkat seiring dengan penambahan besar % reduksi canai dan juga meningkat seiring dengan penambahan waktu *aging*. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada Al 6061 canai reduksi 70% dengan waktu *aging* 5400 detik yaitu sebesar 121 HBN. Selain mengalami kenaikan, nilai kekerasan juga mengalami penurunan. Nilai kekerasan semakin menurun seiring dengan penambahan waktu *aging* setelah mencapai puncak nilai kekerasan. Dari grafik dapat dilihat bahwa setelah Al 6061 dilakukan *aging* pada waktu 7200 dan 10.800 detik, nilai kekerasannya menurun. Hal ini konsisten untuk semua variabel reduksi. Nilai kekerasan terendah pada Al 6061 canai reduksi 70% dengan waktu *aging* 10.800 detik. Fenomena menurunnya nilai kekerasan saat proses *aging* setelah mencapai puncak tertingginya dinamakan *over aging*^[10]. Menurut Demir H.& Gündüz S.^[2], penambahan waktu *aging* dapat menurunkan nilai kekerasan. Hal ini disebabkan karena bergabungnya presipitat

menjadi partikel berukuran yang lebih besar yang mengakibatkan penghalang pergerakan dislokasi menjadi semakin lemah, sehingga sifat mekanik akan menurun. Hal tersebut juga dinyatakan pada penelitian sebelumnya untuk Al 6061^[11, 13, 14], Al 6063^[12] dan Al 319^[15]. Fenomena *over aging* ini dapat dibuktikan dengan analisa menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM). Namun, dalam penelitian ini tidak dilakukan.

Tabel 2 menunjukkan hasil uji keausan untuk Al 6061 *as received* dan Al 6061 setelah proses canai dan *aging*. Peningkatan sifat mekanik tidak hanya terjadi pada nilai kekerasan, tetapi juga pada nilai keausan Al 6061. Laju keausan Al 6061 *as received* lebih cepat dibandingkan dengan Al 6061 setelah proses canai dan *aging*. Hal ini menunjukkan bahwa Al 6061 *as received* lebih mudah mengalami keausan jika dibandingkan dengan Al 6061 setelah canai dan *aging*. Volume material yang terabrasi jauh lebih banyak pada Al 6061 *as received*. Lebar jejak material yang terabrasi juga lebih besar pada Al 6061 *as received*. Jadi dapat disimpulkan bahwa proses canai dingin dan *aging* meningkatkan nilai ketahanan aus Al 6061.

Tabel 2. Hasil pengujian keausan Al 6061

Nama Sampel	Lebar Jejak Material Terabrasi (mm)	Volume Material Terabrasi (mm ³)	Laju Keausan (mm ³ /mm)
<i>As-Received</i>	3,34	0,6209	6,209951 x 10 ⁻⁶
Setelah <i>Aging</i>	3,06	0,4775	4,775436 x 10 ⁻⁶

Ketahanan aus logam berkaitan erat dengan kekerasannya. Sampel setelah proses *treatment* memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibanding sampel kondisi *as received*. Ketika nilai kekerasan tinggi, maka Al 6061 menjadi sukar untuk terabrasi oleh material lain yang jauh lebih keras darinya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Canai dingin menghasilkan perubahan geometri butiran dari *equiaxial* menjadi *elongated grain* dan kembali ke menjadi butir *equiaxial* setelah *aging*.
2. Nilai kekerasan Al 6061 meningkat dari 115 HBN (setelah canai dingin) menjadi 121 HBN (setelah *aging*), hal yang sama juga terjadi pada ketahanan aus Al 6061 yang laju keausannya lebih lambat dari 6,209951 x 10⁻⁶ (Al 6061 *as received*) menjadi 4,775436 x 10⁻⁶ (Al 6061 setelah canai dan *aging*). Hal ini disebabkan mekanisme strain hardening dan hadirnya fasa kedua Mg₂Si dan Al₂FeSi.
3. Penurunan kekerasan terjadi setelah waktu *aging* 7200 dan 10.800 detik, hal ini mungkin disebabkan terjadinya *over aging*.

REFERENSI

- [1] E. Tan, B. Ogel, Influence of heat treatment on the mechanical properties of AA6066 alloy, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 31.1 (2007) 53-60.
- [2] H. Demir, S. Gunduz, The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, Materials & Design. 30.5 (2009) 1480-1483.
- [3] G. Mrówka, Nowotnik, Influence of chemical composition variation and heat treatment on microstructure and mechanical properties of 6xxx alloys, Archives of materials science and engineering. 46.2 (2010) 98-107.
- [4] Z.H. Jin, P. Gumbsch, E. Ma, K. Albe, K. Lu, H. Hahn, H. Gleider, The interaction mechanism of screw dislocations with coherent twin boundaries in different face-centred cubic metals, Scripta Materialia. 54.6 (2006) 1163-1168.
- [5] M.R. Rezaei, M.R. Toroghinejad, F. Ashrafizadeh, Production of nano-grained structure in 6061 aluminum alloy strip by accumulative roll bonding, Materials Science and Engineering. A529 (2011) 442-446.
- [6] D. Muruganandam, S. Ravikumar, S.L. Das, Mechanical and micro structural behavior of 2024–7075 aluminium alloy plates joined by friction stir welding, In Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME). IEEE (2010) 247-251
- [7] L. Su, C. Lu, A.K. Tieu, G. Deng, X. Sun, Ultrafine grained AA1050/AA6061 composite produced by accumulative roll bonding, Materials Science and Engineering. A559 (2013) 345-351.
- [8] M.R. Toroghinejad, F. Ashrafizadeh, R. Jamaati, On the use of accumulative roll bonding process to develop nanostructured aluminum alloy 5083, Materials Science and Engineering. A561 (2013) 145-151.
- [9] M. Ilangoan, S. Rajendra Boopathy, V. Balasubramanian, Microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA6061–AA5086 aluminium alloy joints, Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 25.4 (2015) 1080-1090.
- [10] H.H. Kim, S.H. Cho, C.G. Kang, Evaluation of microstructure and mechanical properties by using nano/micro-indentation and nanoscratch during aging treatment of rheo-forged Al 6061 alloy, Materials Science and Engineering. A485.1 (2008) 272-281.

- [11] G.I.P. De Silva, W.C. Perera, Improvement of the Mechanical Properties of Aluminum 6063 T5 Extrudates by Varying the Aging Condition Cost-Effectively, SAITM Research Symposium on Engineering Advancements .SAITM–RSEA 2012 (2012).
- [12] D.D. Risanti, M. Yin, P.E.J.R.D del Castillo, S.V. der Zwaag, A systematic study of the effect of interrupted ageing conditions on the strength and toughness development of AA6061, Materials Science and Engineering: A523 (2009) 99-111.
- [13] F. Ozturk, A. Sisman, S. Toros, S. Kilic, R.C. Picu, Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy, Materials & Design. 31(2010) 972-975.
- [14] W.J. Kim, J.Y. Wang, Microstructure of the post-ECAP aging processed 6061 Al alloys, Materials Science and Engineering. A464.1 (2007) 23-27.
- [15] E. Wallhagen, Examination of aging aluminum 319, Diss. Worcester Polytechnic Institute. (2007).