

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



PENGARUH PROSES Pengerolan DINGIN TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL AL 6061-T6

Saga Octadamailah^{1,2}, Dwi Marta Nurjaya¹, Supardjo², Ganisa Kurniati Suryaman²

¹Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Depok, Jawa Barat 16425

²Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 65, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: saga.octadamailah@ui.ac.id

(Naskah diterima: 02–01–2021, Naskah direvisi: 02–02–2021, Naskah disetujui: 26–02–2021)

ABSTRAK

PENGARUH PROSES Pengerolan DINGIN TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL AL 6061-T6. Proses pembuatan pelat tutup dan pelat bingkai untuk pelat elemen bakar reaktor G.A. Siwabessy dilakukan dengan cara dirol dingin, sehingga dicapai ketebalan yang diinginkan. Pada penelitian sebelumnya, proses pengerolan dingin pada material AlMg2 menyebabkan perubahan sifat mekanik, dimana material menjadi lebih ulet dan kekuatan tariknya menurun. Pada bahan bakar densitas tinggi, material kelongsong Al 6061-T6 akan digunakan untuk menggantikan material kelongsong sebelumnya, yaitu AlMg2. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan sifat mekanik dari material Al 6061-T6 hasil pengerolan. Untuk melihat perubahan sifat mekanik yang terjadi, dilakukan uji tarik, pengamatan mikrostruktur dan struktur kristal. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa kekuatan tarik, modulus elastis dan kekuatan luluh cenderung naik seiring dengan besarnya derajat reduksi ketebalan. Meskipun demikian, kekuatan luluh dari hasil pengujian cukup rendah. Rasio antara kekuatan luluh dan kekuatan tarik hanya 0,7. Dari hasil pemindaian menggunakan difraksi sinar-X diketahui bahwa proses pengerolan dapat menyebabkan penghalusan ukuran kristalit. Kesimpulan dari penelitian ini secara umum adalah proses pengerolan dapat meningkatkan sifat mekanik material Al 6061-T6.

Kata kunci: Pengerolan dingin, sifat mekanik, Al 6061-T6, kekuatan tarik, modulus elastis.

ABSTRACT

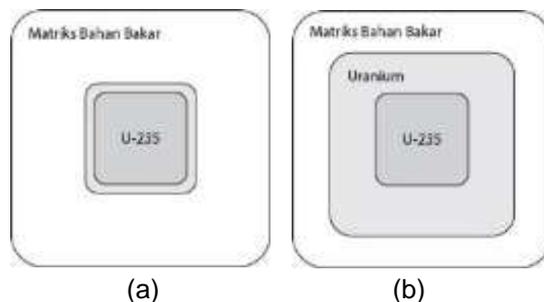
EFFECT OF COLD ROLLING PROCESS ON MECHANICAL PROPERTIES OF AL 6061-T6. *The manufacturing process of cover and frame plates of nuclear fuel element for G.A. Siwabessy reactor has been done by cold rolling at the desired thickness. In the previous studies, cold rolling process on AlMg2 alloy caused changes in mechanical properties, where the material became more ductile and its tensile strength was decreased. For high density fuels, Al 6061-T6 will be used to replace AlMg2 as cladding. The purpose of this research was to determine changes in mechanical properties of the cold rolled Al 6061-T6. To observe the changes, tensile tests were done and microstructure and crystal structure were observed. The results of the tensile test indicate that the tensile strength, elastic modulus and yield strength tend to increase with the degree of thickness reduction. However, the yield strength of the test results was quite low. The ratio between the yield strength and the tensile strength is only 0.7. Results of X-ray diffraction scanning show that the rolling process can cause refinement of crystallite size. The general conclusion of this research is that the cold rolling process can improve the mechanical properties of the Al 6061-T6 material.*

Keywords: *Cold rolling, mechanical properties, Al 6061-T6, tensile strength, elastic modulus.*

PENDAHULUAN

Reaktor riset pada awalnya didesain menggunakan bahan bakar dengan uranium pengkayaan tinggi ($\geq 90\%$ ^{235}U) atau biasa disebut dengan *high enriched uranium* (HEU) [1]. Dengan menggunakan pengkayaan tinggi, reaktor dapat menghasilkan fluks neutron yang sangat tinggi yang diperlukan untuk proses iradiasi maupun pengujian material. Melalui penggunaan fluks neutron yang tinggi, selain dapat mempercepat proses pengujian juga dapat meningkatkan akurasi [2]. Penggunaan uranium pengkayaan tinggi beresiko disalahgunakan untuk digunakan sebagai senjata nuklir, sehingga untuk menghindari perihal tersebut pengkayaan uranium dibatasi sampai kurang dari 20% atau biasa dikenal dengan istilah *low enriched uranium* (LEU) [3]. Kesepakatan pembatasan pengkayaan tersebut tertuang dalam program *reduced enrichment research and test reactor* (RERTR).

Penggunaan LEU menyebabkan performa dari reaktor riset menjadi turun. Agar performa reaktor dapat kembali seperti semula, maka dibuat bahan bakar nuklir densitas tinggi. Ilustrasi antara HEU dan densitas tinggi ditunjukkan pada Gambar 1.

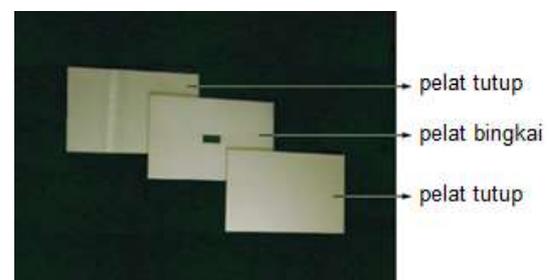


Gambar 1. Ilustrasi bahan bakar (a) HEU, dan (b) densitas tinggi.

Pada Gambar 1.a terlihat bahwa komposisi bahan bakar HEU didominasi oleh matriks, sedangkan pada Gambar 1.b komposisi bahan bakar densitas tinggi didominasi oleh uranium. Reaktor riset, reaktor G.A. Siwabessy (RSG-GAS) menggunakan bahan bakar tipe pelat dengan kelongsong AlMg2. Uranium memiliki kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan AlMg2. Bahan bakar densitas tinggi yang memiliki komposisi uranium lebih banyak dibandingkan dengan bahan bakar HEU menyebabkan bahan bakar densitas tinggi lebih sulit difabrikasi dibandingkan bahan bakar HEU. Penggunaan bahan bakar densitas tinggi menyebabkan

kelongsong pada pelat elemen bakar (PEB) mengalami penipisan yang berlebihan, dimana di beberapa bagian ketebalannya $<0,25$ mm [4]. Untuk mengatasi hal tersebut, material kelongsong perlu diganti dengan material yang memiliki sifat mekanik lebih baik. Material Al 6061-T6 dipilih sebagai kandidat pengganti AlMg2 karena memiliki kekakuan dan kekuatan yang lebih tinggi [5]–[7]. Selain itu Al 6061-T6 juga memiliki tampang lintang serapan neutron yang rendah dan konduktivitas panas yang sama dengan AlMg2.

Proses awal pembuatan PEB adalah pembuatan pelat tutup (*cover*) dan pelat bingkai (*frame*), seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Lubang pada bagian tengah pelat bingkai berfungsi sebagai tempat untuk inti elemen bakar (IEB). Pembuatan pelat tutup dan pelat bingkai dilakukan melalui proses mekanik. Bahan baku pembuatan *frame* dan *cover* adalah pelat Al 6061-T6 dengan ketebalan 6 mm yang dilakukan proses pengerolan dingin sampai dicapai ketebalan yang diinginkan, yaitu 2,7 mm untuk pelat bingkai dan 3,15 mm untuk pelat *cover*. Adanya proses mekanik tersebut tentu saja akan mempengaruhi sifat mekanik material.



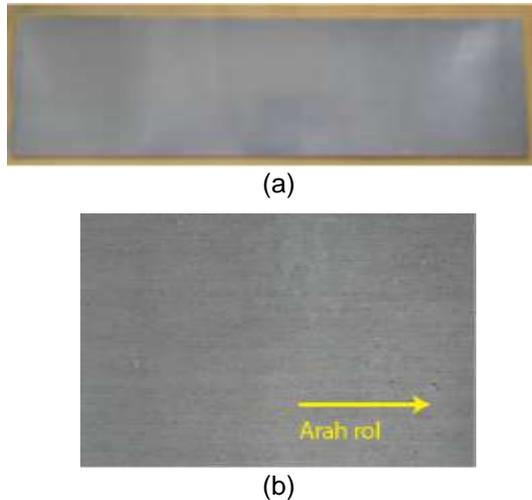
Gambar 2. Pelat tutup dan pelat bingkai [4].

Untuk mengetahui perubahan sifat mekanik material, khususnya kekuatan dan kekakuan dari material, maka pada penelitian ini dilakukan percobaan uji tarik. Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan struktur kristal menggunakan difraksi Sinar-X (XRD).

METODOLOGI

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat Al 6061-T6 dengan ukuran 1000 mm x 170 mm x 6 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.a. Material Al 6061 adalah material aluminium seri 6000 dengan unsur pepadu utama adalah Mg dan Si. Kode T6 menunjukkan bahwa aluminium telah mengalami perlakuan panas, dimana perlakuan panas tersebut bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik. Material hasil

pabrikannya sebelumnya sudah mengalami proses pengerolan. Hal tersebut karena adanya pola garis pada permukaan material, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.b.



Gambar 3. Bahan baku (a) pelat Al 6061-T6
(b) pola hasil pengerolan.

Material bahan baku selanjutnya direduksi ketebalannya dengan cara dirol dingin sehingga dicapai ketebalan berturut turut 4 mm, 3,1 mm dan 2,7 mm. Arah dari proses pengerolan mengikuti arah rol dari pabrikannya untuk mengetahui apakah arah rol berpengaruh pada sifat mekanik material atau tidak. Material hasil proses pengerolan selanjutnya dibuat menjadi beberapa sampel untuk uji tarik, mikrostruktur dan XRD.

a. Pengujian Tarik

Sampel pengujian tarik berbentuk pelat dengan ukuran mengacu pada standar ASTM E8M. Pengujian tarik dilakukan di Gd. 20 Kawasan Puspiptek Serpong Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) – BATAN. Setiap variasi ketebalan dilakukan dua kali pengujian tarik, yaitu pengujian tarik searah dengan arah pengerolan dan pengujian tarik tegak lurus terhadap arah pengerolan. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh arah pengerolan terhadap sifat mekanik material. Dari hasil pengujian tarik akan diperoleh grafik beban terhadap elongasi yang kemudian dihitung untuk memperoleh nilai kekakuan (E) dan kekuatan tarik (UTS) material. Nilai kekakuan dapat dihitung menggunakan hukum Hooke [8] dengan persamaan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad (1)$$

Nilai E diperoleh dari nilai tegangan (σ) dibagi dengan nilai regangan (ε). Nilai tegangan diperoleh dari pembagian nilai beban (F) dengan luas area penampang sampel (A), sedangkan nilai regangan merupakan persen elongasi.

b. Mikrostruktur

Sampel yang digunakan untuk mikrostruktur berbentuk pelat dengan ukuran 2 cm x 2 cm. Sampel tersebut kemudian dipotong menjadi tiga bagian. Ketiga potongan tersebut disusun sedemikian rupa dan *dimounting* menjadi satu sehingga dapat diketahui mikrostruktur yang terbentuk secara 3D (arah x, y, dan z). Etsa yang digunakan adalah campuran dari asam nitrat, asam klorida, dan asam florida, atau biasa disebut sebagai reaktan Keller. Reaktan Keller dipilih karena sudah umum digunakan untuk etsa pada aluminium, khususnya untuk melihat batas butir dan orientasi dari arah pengerolan [9]. Preparasi dan pengujian struktur mikro dilakukan di Gd. 65 PTBBN – BATAN.

c. Difraksi Sinar-X (XRD)

Pengujian dengan XRD dilakukan untuk melihat ukuran kristalit. Ukuran kristalit dapat disamakan dengan ukuran butir. Pada beberapa kasus, khususnya pada material hasil pengerolan, batas butir tidak dapat diamati menggunakan mikroskop optik, sehingga sulit untuk menentukan ukuran butir. Disisi lain, XRD selain dapat digunakan untuk mengidentifikasi fasa juga dapat digunakan untuk mengetahui ukuran kristalit. Ukuran kristalit dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer [10],[11].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

Dimana D adalah ukuran kristalit, K adalah konstanta Scherrer (0,9), λ adalah panjang gelombang dari sinar-X, β adalah nilai FWHM, dan θ adalah sudut puncak dari difraksi sinar-X. Pemancar sinar-X pada penelitian ini menggunakan anoda Co dengan $\lambda = 1,79 \text{ \AA}$. Perhitungan nilai FWHM dan sudut puncak dilakukan secara otomatis menggunakan software *HighScore*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ukuran sampel uji tarik pelat Al 6061-T6 hasil pengerolan ditunjukkan pada Tabel 1. Ketebalan hasil pengerolan tidak dapat tepat sesuai dengan ketebalan pelat tutup dan pelat bingkai yang sesungguhnya disebabkan

prosedur pengerolan masih menggunakan prosedur pengerolan pelat AlMg2, sedangkan material yang dirol telah diganti menggunakan

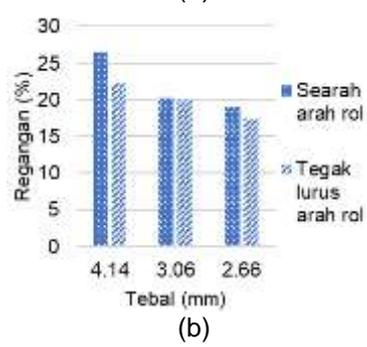
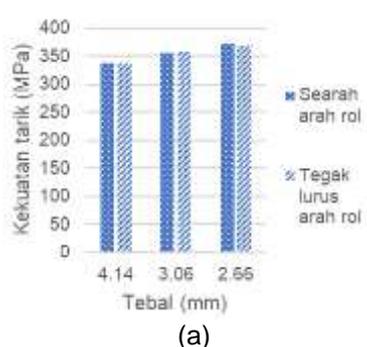
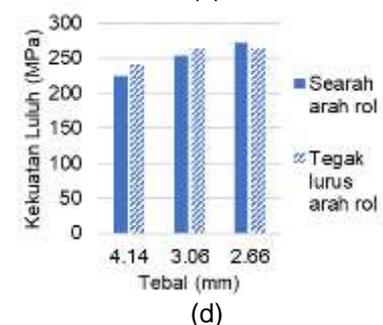
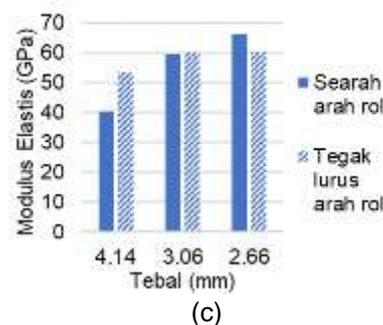
Al 6061-T6. Namun begitu seharusnya tidak berdampak signifikan terhadap kesimpulan yang diperoleh.

Tabel 1. Ukuran sampel uji tarik pelat Al 6061-T6 hasil rol.

Sampel	Arah rol	Panjang (l ₀), mm	Lebar (w), mm	Tebal (t), mm	Luas Penampang (A), mm
A1	Searah	31	6	4,14	24,84
A2	Tegak lurus	31	6	4,14	24,84
B1	Searah	31	6	3,06	18,36
B2	Tegak lurus	31	6	3,06	18,36
C1	Searah	31	6	2,66	15,96
C2	Tegak lurus	31	6	2,66	15,96

a. Pengujian Tarik

Hasil uji tarik ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum hasil pada Gambar 4.a menunjukkan bahwa arah pengerolan tidak berpengaruh terhadap kekuatan tarik atau *ultimate tensile strength* (UTS) dari material. Untuk sampel uji tarik dengan ketebalan 4,14 mm misalnya, baik searah maupun tegak lurus arah pengerolan memiliki nilai UTS sekitar 337 MPa. Demikian pula untuk sampel uji yang lain. Sampel dengan ketebalan 3,06 mm dan 2,66 mm secara berurutan memiliki nilai UTS sekitar 356 MPa dan 370 MPa. Pengaruh yang cukup besar terhadap nilai UTS adalah proses pengerolan itu sendiri, dimana semakin besar reduksi ketebalan akan semakin meningkatkan kekuatan material, tetapi sebaliknya nilai regangan semakin menurun atau material menjadi lebih getas.



Gambar 4. Hasil uji tarik pelat Al 6061 hasil rol. (a) Pengaruh reduksi ketebalan terhadap kekuatan tarik. (b) Pengaruh reduksi ketebalan terhadap regangan. (c) Pengaruh reduksi ketebalan terhadap modulus elastis. (d) Pengaruh reduksi ketebalan terhadap kekuatan luluh.

Sifat mekanik yang ditunjukkan pada material Al 6061-T6 hasil pengerolan berbeda dengan sifat mekanik pada material AlMg2 hasil pengerolan, dimana arah pengerolan berpengaruh terhadap keuletan material AlMg2. Hasil pengujian tarik yang searah pengerolan memiliki keuletan yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang tegak lurus arah pengerolan. Selain itu semakin besar derajat reduksi ketebalan pelat AlMg2 akan semakin menurunkan kekuatan tarik, sedangkan pada material Al 6061-T6 justru sebaliknya [12].

Hasil perhitungan untuk modulus elastis ditunjukkan pada Gambar 4.c. Nilai modulus elastis yang didapat jauh dari standar yang seharusnya, yaitu 69 GPa [14]. Nilai modulus elastis yang rendah dapat disebabkan karena pengukuran elongasi yang kurang akurat. Material logam secara umum bersifat elastis pada rentang elongasi 0-2%. Sampel ukuran mini memiliki panjang *gauge* sebesar 31 mm. Untuk elongasi sebesar 2% perubahan panjangnya hanya sekitar 0,62 mm, sehingga dibutuhkan alat yang cukup presisi. Kemungkinan lain adalah material yang diuji memiliki sifat mekanik yang cenderung lebih ulet dibandingkan dengan standar yang ada. Pola yang ditunjukkan pada Gambar 4.c menunjukkan bahwa nilai modulus elastis akan meningkat seiring banyaknya reduksi ketebalan yang dilakukan.

Hasil perhitungan kekuatan luluh ditunjukkan pada Gambar 4.d. Walaupun memiliki kekuatan tarik yang tinggi, namun kekuatan luluhnya cukup rendah. Rasio rerata kekuatan luluh terhadap kekuatan tariknya adalah 0,7, sedangkan umumnya untuk material Al 6061-T6 memiliki rasio 0,9 [14]. Kekuatan luluh yang rendah disebabkan sifat material yang ulet. Regangan daerah elastis sampel berada pada rentang antara 0-3%, sedangkan untuk daerah plastisnya berada antara 3-20%. Nilai UTS baru tercapai pada elongasi sekitar 15%. Ini berarti pada rentang antara 3-15% mengalami *strain hardening* dan perbandingan antara nilai regangan dan tegangan tidak proporsional.

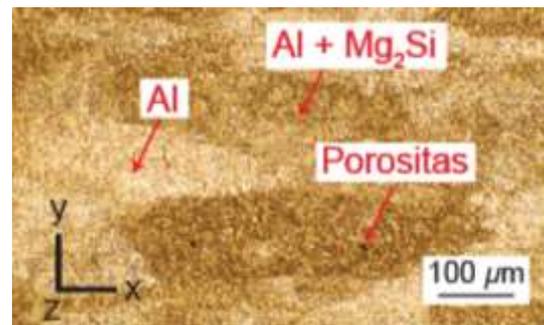
b. Mikrostruktur

Hasil metalografi menggunakan mikroskop optik untuk bagian permukaan material Al 6061-T6 hasil pengerolan ditunjukkan pada Gambar 5.a. Area yang terang adalah fasa α -aluminium, sedangkan area yang gelap adalah fasa sekunder atau presipitat, yaitu area perpaduan antara aluminium dan Mg_2Si [15],[16]. Presipitat tersebut berfungsi sebagai penguat pada material Al 6061-T6, dan dapat diperkeras dengan perlakuan panas.

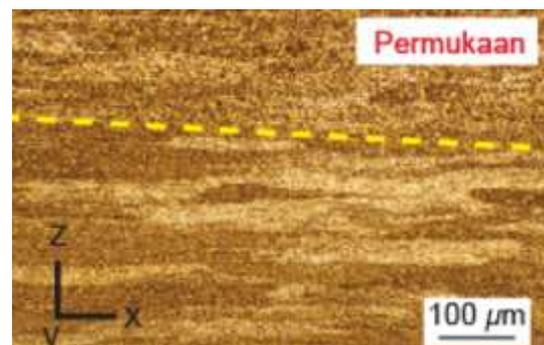
Pengamatan mikrostruktur juga dilakukan pada tampang lintang searah dengan arah pengerolan, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.b. Dengan perbesaran yang hanya 50 kali, area yang diamati menjadi lebih luas. Pada Gambar 5.b terlihat bahwa pada bagian permukaan, ukuran partikel fasa α -aluminium dan presipitat cukup halus sehingga kedua fasa tersebut tercampur secara merata, sedangkan pada bagian yang

lebih dalam, area antara fasa α -aluminium dan presipitat masih terlihat jelas.

Pada pelat hasil pengerolan dengan ketebalan 2,66 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, terlihat bahwa ukuran fasa semakin halus, dan percampuran antara fasa α -aluminium dan presipitat semakin dalam dan tidak terlihat lagi batas antara bagian permukaan dan bagian dalam seperti pada pelat dengan ketebalan 4,14 mm. Ini menunjukkan bahwa deformasi merambat dari permukaan menuju ke bagian dalam material.

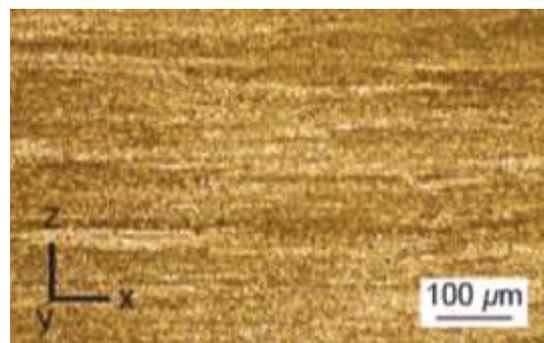


(a)



(b)

Gambar 5. (a) Struktur mikro tampang lintang permukaan rol dan (b) Struktur mikro tampang lintang searah arah rol untuk Al 6061-T6 dengan ketebalan 4,14 mm.

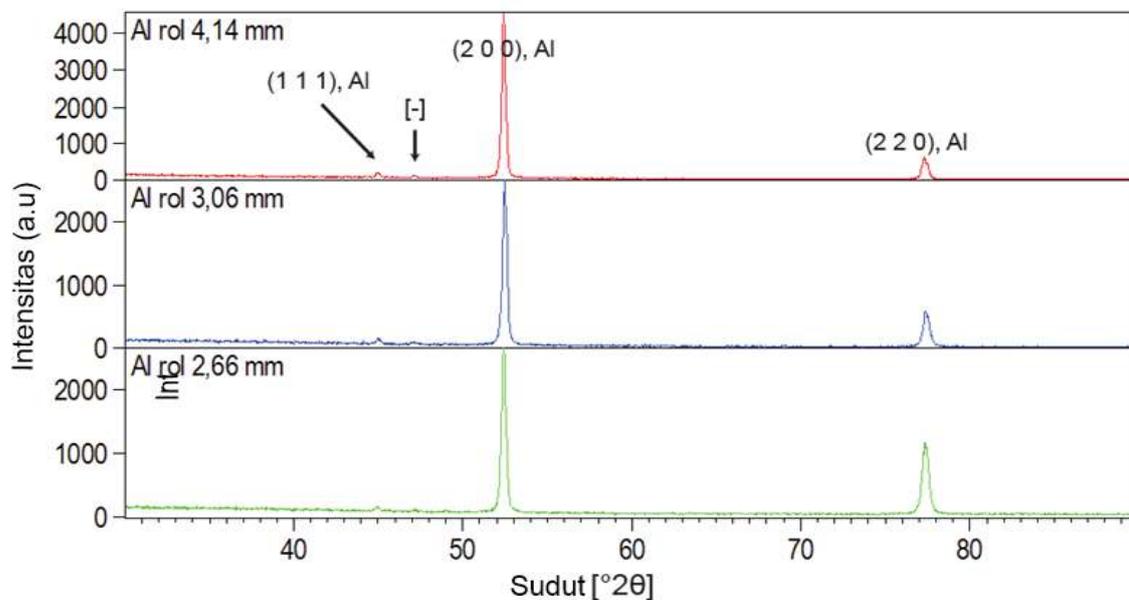


Gambar 6. Struktur mikro Al 6061-T6 hasil rol dengan ketebalan 2,66 mm pada tampang lintang searah arah rol.

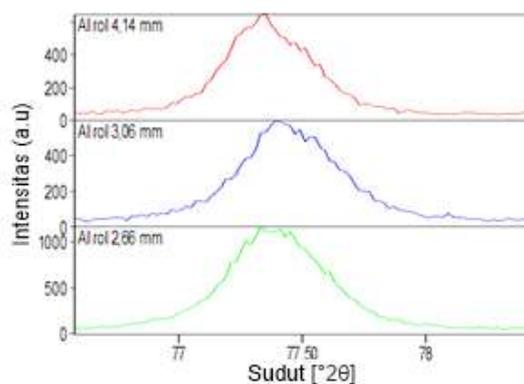
c. Difraksi Sinar-X

Hasil pemindaian menggunakan difaksi sinar-X ditunjukkan pada Gambar 7. Terdapat empat puncak yang berhasil dideteksi pada masing-masing hasil pengerolan, yaitu pada sudut 2θ sebesar 45° , 47° , $52,5^\circ$, dan $77,5^\circ$. Dari hasil identifikasi fasa, tiga puncak diketahui adalah milik fasa aluminium, yaitu sudut 45° , $52,5^\circ$, dan $77,5^\circ$, sedangkan pada sudut 47° sulit diidentifikasi karena intensitasnya yang sangat kecil. Namun

demikian pada sudut tersebut kemungkinan adalah puncak fasa sekunder atau presipitat. Pada Gambar 7 terlihat bahwa semakin besar derajat deformasi akibat proses pengerolan, intensitas pada sudut $77,5^\circ$ juga semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengerolan menyebabkan orientasi tertentu pada bidang kristal, yang dalam hal ini terjadi orientasi pada sudut $77,5^\circ$ atau bidang (2 2 0).



Gambar 7. Hasil pemindaian difraksi sinar-X untuk material Al 6061-T6 hasil rol. 2θ .



Gambar 8. Hasil pemindaian difraksi sinar-X pada bidang (2 2 0).

Jika pada sudut bidang (2 2 0) diperbesar, maka akan terlihat pergeseran sudut yang sangat kecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Semakin besar derajat deformasi yang terjadi, sudut 2θ pada bidang (2 2 0) akan semakin bergeser ke arah kanan. Pergeseran puncak tersebut apabila dihubungkan dengan persamaan 2

menunjukkan terjadinya penghalusan ukuran kristalit. Namun begitu, ukuran kristalit juga dipengaruhi oleh nilai *Full Width Half Maximum* (FWHM), sehingga nilai FWHM juga perlu dihitung untuk menentukan ukuran kristalit secara tepat.

Tabel 2. Hasil perhitungan ukuran kristalit.

Bidang kristal	Ukuran kristalit (nm)		
	4,14 mm	3,06 mm	2,66 mm
(1 1 1)	49,920	55,471	38,397
(2 0 0)	47,380	39,402	38,798
(2 2 0)	40,453	32,205	31,676
Rerata	45,918	42,360	36,290

Hasil perhitungan ukuran kristalit menggunakan *HighScore* ditunjukkan pada Tabel 2. Dengan menggunakan XRD, ukuran kristalit dari masing-masing bidang kristal dapat diketahui. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa hampir disemua bidang menunjukkan pola yang sama, yaitu semakin

tinggi derajat deformasi dari proses pengerolan menyebabkan ukuran kristalit menjadi semakin kecil, kecuali pada bidang (1 1 1) dengan ketebalan 3,06 mm saja yang mengalami kenaikan ukuran kristalit. Hal ini menunjukkan bahwa rekristalisasi dapat terjadi pada proses pengerolan dingin. Ukuran kristalit rerata untuk ketebalan 4,14 mm, 3,06 mm, dan 2,66 mm secara berturut-turut adalah 45,918 nm, 42,360 nm, dan 36,290 nm. Penghalusan ukuran kristalit dan bentuk mikrostruktur presipitat menjelaskan kenaikan kekuatan tarik pada material Al 6061-T6 hasil pengerolan dapat terjadi.

SIMPULAN

Proses pengerolan dingin pada Al 6061-T6 dapat meningkatkan kekuatan tarik material tersebut. Hasil untuk pengujian mikrostruktur menunjukkan bahwa proses pengerolan dapat menyebabkan distribusi presipitat menjadi lebih merata. Peningkatan kekuatan tarik material berhubungan dengan mengecilnya ukuran kristalit akibat proses pengerolan. Ukuran kristalit yang mengecil menandakan ukuran butir juga ikut mengecil. Ukuran butir yang mengecil akan meningkatkan kekuatan material. Kekuatan luluh dari hasil pengujian cukup rendah. Walaupun memiliki kekuatan tarik yang tinggi, kekuatan luluh yang rendah menunjukkan bahwa material mudah terdeformasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Yatno Dwi Agus Susanto yang telah membantu dalam proses pengerolan, Hanif Gufron dan Praditya Vankabo yang telah membantu pembuatan sampel pengujian, Isfandi yang telah membantu pengujian metalografi, Slamet Pribadi yang telah membantu pengujian XRD, Sri Ismarwanti dan Guswardani yang telah membantu pengujian tarik, serta Jan Setiawan yang telah memberikan arahan, khususnya untuk pengujian XRD.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.A. Jonah, et al. "The impact of HEU to LEU Conversion on Utilization of NIRR-1." *Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization Proceedings of an International Conference Proceedings, Rabat, Morocco, 14-18 November 2011*.
- [2] W. R. Corliss, *Neutron Activation Analysis*. U.S. Atomic Energy Commission, 1963.
- [3] *Management of high enriched uranium for peaceful purposes: status and trends*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [4] Supardjo, A. Kadarjono, Isfandi, Y. D. A. Susanto, S. Permana, dan Guswardani, "Percobaan pembuatan pelat elemen bakar U-7Mo-xSi/Al dalam ukuran mini," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 25, no. 3, Oct. 2019.
- [5] S. M. Rajaa, H. A. Abdulhadi, K. S. Jabur, and G. R. Mohammed, "Aging time effects on the mechanical properties of Al 6061-T6 alloy," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 4, pp. 3113–3115, Aug. 2018.
- [6] N. M. Anas, T. E. Abioye, A. S. Anasyida, B. K. Dhindaw, H. Zuhailawati, and A. Ismail, "Microstructure, mechanical and corrosion properties of cryorolled-AA5052 at various solution treatment temperatures," *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, p. 016535, Jan. 2020.
- [7] A. Bhowmik and D. Mishra, "A comprehensive study of an aluminum alloy Al-5052," *Advance Physics Letter*, vol. 3, no. 1, 2016.
- [8] Widayani, T. D. K. Wungu, and S. Viridi, "The influence of tensile angle direction on the Young Modulus of Single and combination of two anisotropic materials," *International Journal of Composite Materials*, vol. 9, no. 2, pp. 33–38, May 2019.
- [9] A. Tamadon, D. Pons, K. Sued, and D. Clucas, "Development of metallographic etchants for the microstructure evolution of A6082-T6 BFSW Welds," *Metals*, vol. 7, no. 10, p. 423, Oct. 2017.
- [10] M. Sumadiyasa and I. B. S. Manuaba, "Determining crystallite size using Scherrer Formula, Williamson-Hull Plot, and particle size with SEM," *Buletin Fisika*, vol. 19, no. 1, p. 28, Jul. 2018.
- [11] M. Rabiei, A. Palevicius, A. Monshi, S. Nasiri, A. Vilkauskas, and G. Janusas, "Comparing methods for calculating nano crystal size of natural hydroxyapatite using X-Ray Diffraction," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 9, p. 1627, Aug. 2020.
- [12] Sungkono and S. Ismarwanti, "Pengaruh arah pengerolan dan shear cutting terhadap karakter paduan

- AlMg₂ sebagai material cladding bahan bakar reaktor riset,” *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 26, no. 3, Oct. 2020.
- [13] Y. Chen, B. Q. Lu, and H. A. Zhang, “Hardening and precipitation of a commercial 6061 Al alloy during natural and artificial ageing,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 770, p. 012065, Mar. 2020.
- [14] *ASM handbook*. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990.
- [15] A. A. Alhamidi and M. Dewi, “microstructural and mechanical properties Al 6061 processed by cold rolling and aging,” *VANOS Journal of Mechanical Engineering Education*, vol. 3, no. 1, Jul. 2018.
- [16] D. Zhou, W. Du, X. Wen, J. Qiao, W. Liang, and F. Yang, “local deformation and texture of cold-rolled AA6061 aluminum alloy,” *Materials*, vol. 11, no. 10, p. 1866, Oct. 2018.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN