

Kontribusi Proses ECAP dengan Variasi Rute dan Jumlah Lajuan terhadap Penguatan Alumunium Tanpa Paduan Komersil

Gunawarman

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang 25163
E-mail : gunawarman@ft.unand.ac.id

Abstrak

Krisis energi nasional belakangan ini yang dipicu oleh kenaikan harga minyak dunia secara tidak langsung memicu penggunaan material ringan untuk struktur kendaraan bermotor agar pemakaian bahan bakar minyak dapat lebih hemat. Salah satu material ringan yang dapat digunakan sebagai bahan kendaraan dengan cadangan cukup berlimpah di tanah air adalah Aluminium (Al). Namun begitu, kekuatan Al terutama Al murni belum memadai untuk struktur. Karena itu perlu dikembangkan metoda penguatan yang dapat diterapkan pada Al maupun logam ringan lain agar kekuatannya menyamai atau bahkan melebihi baja, material utama struktur saat ini. Penelitian ini bertujuan memperkuat Al dengan pembentukan struktur mikro atau sub-mikro melalui sebuah teknik baru yakni proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP).

Proses ECAP pada studi ini dilakukan pada Alumunium komersil berpenampang persegi $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Al tersebut kemudian dilewatkan pada cetakan ECAP dengan sudut cetakan 90° dan sudut busur 20° tanpa mengubah ukuran penampang Al. Dengan memvariasikan putaran sampel dan jumlah lajuan, struktur mikro dan sifat mekanik bahan pada tiap lajuan diperiksa secara seksama.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan Al meningkat jauh setelah proses ECAP. Kekuatan yang terbentuk bervariasi tergantung kepada variasi putaran sample dan jumlah lajuan. Spesimen rute A yakni tanpa mengubah orientasi sample memberikan kekuatan tertinggi. Kekuatan meningkat dengan meningkatnya jumlah lajuan. Peningkatan kekuatan disebabkan terutama oleh penghalusan butir yang mencapai ukuran mikro.

Kata kunci: Alumunium, ECAP, Penguatan, Struktur

Pendahuluan

Aluminium (Al) adalah salah satu logam ringan yang memiliki banyak kelebihan, antara lain, tahan korosi, tampilan menarik, mudah dibentuk dan cadangannya berlimpah di kerak bumi melebihi cadangan besi (Fe) [1-4]. Namun penggunaannya di lapangan masih sedikit (kurang dari 10%) dibandingkan dengan baja (lebih dari 80%) karena Al memiliki kekuatan rendah dan harga relatif mahal [5]. Berbagai upaya dilakukan untuk memperkuat Al. Cara konvensional seperti pemaduan diikuti dengan perlakuan panas seperti yang diterapkan pada material pesawat terbang (Al 2024) [4,6]. Dengan teknik ini kekuatan Al meningkat melebihi 300 MPa. Konsekuensi serius dari teknik ini adalah peningkatan harga yang signifikan, penurunan ketahanan korosi, kontrol kehomogenan komposisi paduan yang cukup sulit, dan peningkatan biaya *recycling* [4]. Karena itu penggunaan Al dengan komposisi sederhana atau tanpa/sedikit paduan (Al seri 1xxx, Al>99%) lebih disukai. Namun selama ini tidak ada metoda penguatan konvensional yang secara signifikan dapat meningkatkan kekuatan Al tanpa paduan tersebut.

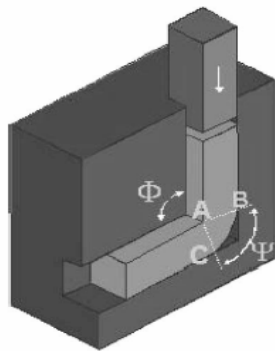
Beberapa tahun belakangan, berbagai usaha dan metoda telah dilakukan peneliti untuk meningkatkan kekuatan Aluminium [7-20]. Hal ini terutama dipicu oleh kenaikan bahan bakar minyak yang memaksa industri kendaraan bermotor melirik material ringan seperti Al untuk mengurangi bobot kendaraan agar lebih hemat energi. Metoda penguatan terbaru yang paling berkembang saat ini adalah *severe plastic deformation*, *SPD*, yaitu pemberian deformasi plastis yang tinggi dan merata pada bahan melalui pengerolan akumulatif (*accumulative rolling*), puntir kecepatan tinggi (*high speed torsion*), ekstrusi tekan, dan ECAP (*equal channel angular pressing*). Diantara berbagai proses SPD ini ECAP adalah yang paling potensial diaplikasikan di dunia industri karena dapat diterapkan pada

material yang cukup besar tanpa mengubah penampang bahan [7-9]. Pada proses ECAP terjadi penghalusan butir yang signifikan sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan yang berarti seperti yang dibuktikan oleh peneliti Amerika dan Jepang. Namun begitu, masih banyak hal yang mesti diteliti secara cermat dari proses ini sebelum diterapkan di dunia industri. Salah satunya adalah, sebagai contoh, belum terlalu jelas pengaruh tingkat deformasi atau jumlah laluan terhadap sifat mekanik bahan. Lebih lanjut masih terdapat pertentangan di kalangan peneliti tentang proses mana yang dapat menghasilkan kekuatan yang paling tinggi. Karena itu kajian ini sangat menarik untuk diteruskan dan dikembangkan dalam rangka mendapatkan proses ECAP yang paling efektif untuk menghasilkan Aluminium super kuat. Dalam penelitian ini kami mencoba melihat pengaruh rute dan jumlah laluan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro Aluminium komersil.

Pada tulisan sekarang ini dilaporkan perkembangan penelitian dengan bahasan pengaruh jumlah laluan pada proses ECAP terhadap sifat mekanik dan struktur mikro aluminium murni komersial produksi dalam negeri yang banyak terdapat di pasaran. Material diproses dengan ECAP rute C untuk 1 sampai 4 kali laluan pada temperatur kamar. Sifat mekanik yang dievaluasi adalah antara lain kekuatan, keuletan dan kekerasan.

Pengertian ECAP

Equal Channel Angular Pressing (ECAP) adalah satu proses SPD yang dikembangkan pertama kalinya oleh Segal dkk [7]. Selama proses ECAP material mengalami regangan plastis berupa geseran dalam sebuah alur berbentuk L berpenampang tetap seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Prinsip ECAP

Geseran yang terjadi selama proses ECAP akan mengubah orientasi dan ukuran butir material sebagai akibat pergerakan atom-atom ketika melalui daerah geser sehingga struktur dan ukuran butir material menjadi lebih halus. Besarnya regangan yang terjadi dapat ditentukan dengan persamaan [8]:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Phi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

dimana N adalah jumlah laluan, Φ adalah sudut yang dibentuk oleh kedua alur, dan Ψ adalah sudut kelengkungan pada simpangan alur (lihat Gambar 1). Bila sudut alur dan kelengkungan sebesar masing-masing 90° dan 20° , maka regangan yang dihasilkan untuk setiap laluan pada cetakan dengan adalah sekitar 1 (100%). Regangan lebih besar dapat diperoleh melalui penekanan dilakukan berulang-ulang. Sebagai contoh, untuk mendapatkan regangan sebesar 8 (800%) diperlukan 8 kali laluan.

Rute Proses ECAP

Cara pemasukan spesimen untuk tiap laluan dapat divariasikan. Secara umum berdasarkan pemutaran sample, rute proses ECAP dibagi atas tiga bagian (Gambar 2) yaitu :

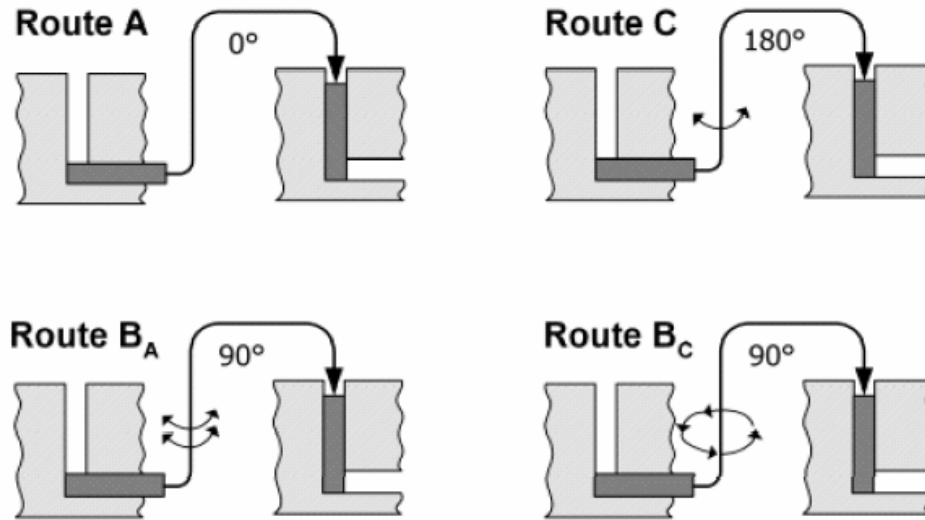
- ◆ Rute A, yaitu rute dengan pemutaran sample sebesar 0° untuk tiap langkah proses.
- ◆ Rute B, yaitu rute dengan pemutaran sample sebesar 90° untuk tiap langkah proses.
- ◆ Rute C, yaitu rute dengan pemutaran sample sebesar 180° untuk tiap langkah proses.

Sementara rute B dibagi lagi menjadi dua yaitu :

1. Rute B_A, yaitu rute dengan pemutaran sample sebesar 90° dengan arah berlawanan (*Alternate direction*) diantara setiap langkah proses.
2. Rute B_C, yaitu rute dengan pemutaran sample sebesar 90° dengan arah yang sama (*same direction*) diantara setiap langkah proses.

Bahan dan Metodologi Penelitian

Material yang digunakan dalam pengujian ECAP ini adalah aluminium komersil dengan ukuran butir $\sim 100 \mu\text{m}$ berbentuk batangan $10 \times 10 \times 100 \text{ mm}$. Proses ECAP rute C kemudian diterapkan pada material dengan menggunakan mesin pres berkapasitas 30 ton. Jumlah langkah proses dilakukan 1-4 kali untuk melihat pengaruh jumlah laluan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro bahan.



Gambar 2 Rute Proses ECAP [8]

Cetakan

Cetakan ECAP dibuat dari material baja perkakas (tool steel) dengan sudut antar alur cetakan 90° , dan sudut kelengkungan sebesar 20° .

Pengujian Kekerasan

Kekerasan spesimen sebelum dan sesudah proses ECAP diukur dengan alat uji kekerasan mikro merek Shimadzu Hardness Tester Type M dengan indentor piramida intan pada beban 300 kgf selama 15 detik.

Pengujian Tarik

Pengujian tarik yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan aluminium sebelum dan sesudah proses ECAP. Pengujian tarik menggunakan mesin uji tarik merek Com-Ten pada kecepatan *cross head* 5 mm/menit dengan menggunakan *speed control* (jika kecepatan pengujian lebih dari 2 inchi/menit, maka beban yang dipakai maksimal 75 % dari kapasitas *load cell*). Selama pengujian juga digunakan kamera digital untuk merekam data proses pengujian, rekaman ini kemudian diterjemahkan menjadi kurva uji tarik.

Metalografi

Proses metalografi dilakukan pada sampel dengan ukuran $10 \times 10 \text{ mm}$. Spesimen dibingkai dengan campuran resin lycal dengan hardener dengan perbandingan 3:1 dan/atau resin plastik dengan penambahan beberapa tetes katalis. Pengamplasan dilakukan bertahap menggunakan kertas amplas *grade* 80, 100, 220, 400, 800, 1000 dan 1500. Kemudian dilanjutkan dengan pemolesan menggunakan serbuk alumina. Spesimen dicuci dengan air setelah pemolesan selesai, kemudian dikeringkan dengan menggunakan udara panas. Pengetsaan menggunakan larutan etsa yang terdiri dari HNO_3 15ml, HF 15

ml, HCl 45 ml, aquades 25 ml. Spesimen digoyang dalam larutan dengan menggunakan penjepit dari kayu selama 1-3 detik lalu didiamkan di udara terbuka selama lebih kurang 24 jam. Pengamatan pada mikroskop optik OPTIHOT S200.

HASIL DAN PEMBAHASAN

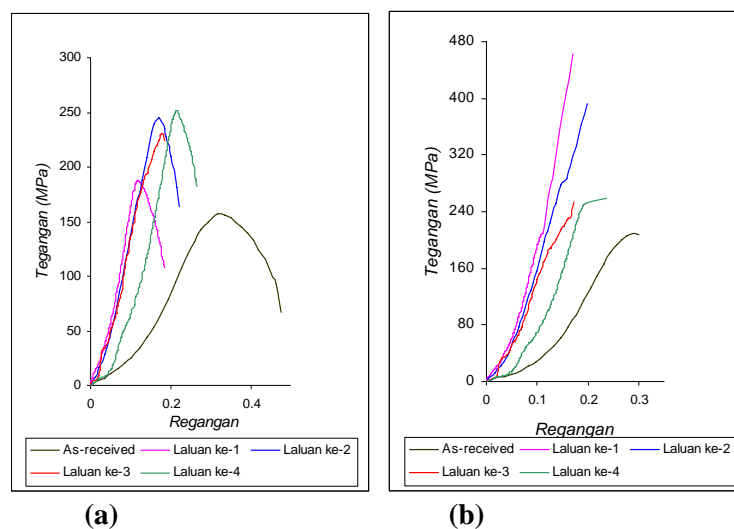
Kekuatan Tarik

Hasil pengujian tarik yang berbentuk kurva tarik dikonversikan ke dalam kurva tegangan regangan teknis dan kurva tegangan regangan sebenarnya diperlihatkan pada Gambar 3. Kurva ini menunjukkan bahwa aluminium hasil ECAP menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan laluan pertama dan terus berlanjut pada laluan berikutnya. Namun terlihat bahwa margin peningkatan kekuatan cenderung menurun dengan peningkatan jumlah laluan.

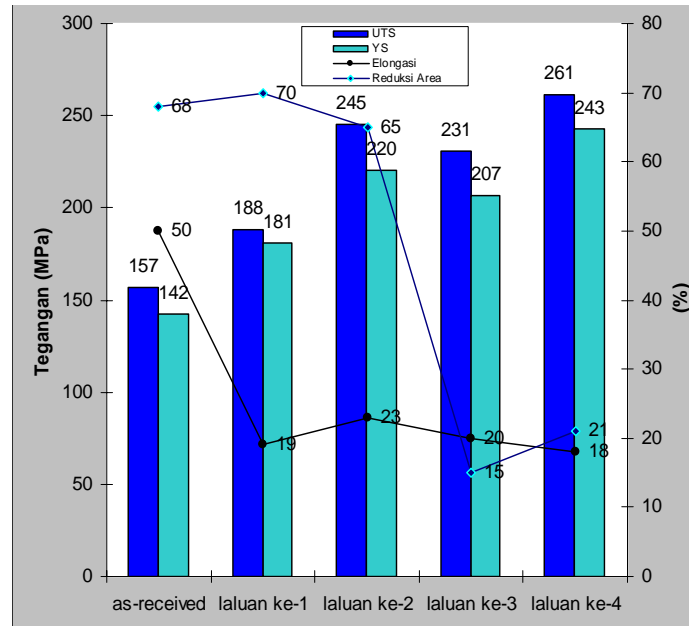
Pada daerah elastis kurva tegangan regangan teknis, terlihat bahwa kemiringan kurva meningkat drastis setelah proses ECAP. Hal ini menunjukkan bahwa modulus elastisitas bahan meningkat setelah proses ECAP. Sementara tidak ada pengaruh yang signifikan dari jumlah laluan terhadap modulus elastisitas dimana kurva untuk laluan ke-1, 2 dan 3 bisa dikatakan berhimpitan. Pada laluan 4, meskipun tidak berhimpitan, namun kemiringan kurva relatif sama. Penyimpangan pada awal deformasi adalah karena slip yang terjadi pada awal penarikan. Trend kurva tarik pada penelitian ini hampir sama dengan pengujian tarik pada paduan aluminium AA6082 yang dilakukan oleh P. Bascani dkk [20].

Data pengujian menunjukkan bahwa kekuatan tarik Aluminium tanpa paduan pada kondisi *as-received* atau sebelum proses ECAP adalah 157 Mpa seperti ditampilkan pada Gambar 4. Harga kekuatan ini berada dalam rentang kekuatan Al seri 1000 dan 1100. Kekuatan tarik Al seri 1000 adalah ~145 MPa, sementara kekuatan tarik Al 1100-H16 adalah ~165 MPa.

Secara umum dapat dikatakan bahwa kekuatan tarik dan kekuatan luluh meningkat dengan meningkatkan jumlah laluan. Peningkatan kekuatan paling tinggi terjadi pada laluan pertama, hal ini karena penghalusan butir paling signifikan terjadi pada laluan pertama seperti yang diperlihatkan oleh struktur mikro bahan yang akan dibahas di bawah. Penurunan elongasi yang cukup besar yakni dari 50 % sebelum diproses menjadi sekitar 20 % setelah proses ECAP untuk semua laluan seperti yang diperoleh oleh Furukawa dkk [9].



Gambar 3. (a) Kurva tegangan regangan teknis dan (b) tegangan regangan sebenarnya dari aluminium komersial ECAP rute C.



Gambar 4. Sifat mekanik Aluminium komersial pada kondisi as-received (sebelum ECAP) dan setelah ECAP rute C.

Walaupun kecenderungan perubahan kekuatan tarik (UTS) dikonfirmasi dengan baik oleh perubahan YS, namun tidak begitu dengan elongasi dan reduksi penampang dimana keduanya tidak berbanding lurus. Hal ini mungkin disebabkan terutama oleh perbedaan lokasi patahan seperti terlihat. Namun demikian semua spesimen menunjukkan patah ulet dimana terjadi pengecilan penampang (*necking*) yang signifikan sebelum mengalami patahan.

Kekerasan

Hal yang sama dengan perubahan kekuatan juga terjadi pada kekerasan mikro aluminium dimana kekerasan meningkat dengan meningkatnya jumlah laluan. Sudah umum diketahui bahwa kekerasan sebanding dengan kekuatan baik untuk penguatan konvensional maupun penguatan hasil ECAP [21].

Secara keseluruhan, kekerasan mikro meningkat sebesar 84% pada arah melintang dan 74% pada arah memanjang. Hasil ini lebih baik dari yang didapatkan oleh Chang dkk [22] yang melakukan ECAP atas paduan aluminium 6061 mendapatkan peningkatan kekerasan mikro sebesar 72 % pada bidang melintang dan sebesar 41 % pada bidang memanjang

Harga kekerasan mikro as-received terlihat bidang memanjang lebih keras dibandingkan bidang melintang. Namun setelah proses ECAP rute C harga kekerasan kedua bidang hampir sama, bahkan bidang melintang tercatat sedikit lebih keras.

Grafik distribusi kekerasan mikro yang didapat terlihat merata diseluruh permukaan ukur. Hal ini menunjukkan bahwa ECAP mampu menghasilkan peningkatan kekerasan yang lebih merata dibandingkan dengan penguatan strain hardening (cold rolling) dan termomekanik yang cenderung lebih bersifat lokal.

Struktur mikro

Gambar struktur mikro dari spesimen tiap laluan diperlihatkan pada Gambar 5. Semua Gambar menunjukkan pola butiran yang cukup jelas. Pada Gambar terlihat bahwa butir berubah dari *elongated* ke *equiaxed* pada laluan pertama. Namun pada laluan kedua perubahan *equiaxed* ke *elongated* mulai tampak dengan butir warna gelap lebih panjang dari sebelumnya. Tampak ada

kecenderungan bahwa butir bersifat lebih *elongated* pada laluan ganjil dan lebih *equiaxed* pada laluan genap. Hal ini mungkin disebabkan oleh perubahan pola geseran seperti yang diusulkan oleh peneliti sebelumnya [8,9]. Karena efek pemutaran sampel sebesar 180°C (rute C) dimana pola butiran cenderung kembali *equiaxed* tiap 2 kali laluan (360°C).

Pengukuran ukuran butir dengan metode point counting menunjukkan bahwa diameter butir rata-rata pada masing-masing gambar yaitu; 92 µm as-received, 35 µm setelah laluan ke-1, 31 µm setelah laluan ke-2, setelah laluan ke-3 mencapai 27 µm, dan akhirnya menjadi 18 µm setelah laluan ke-4.

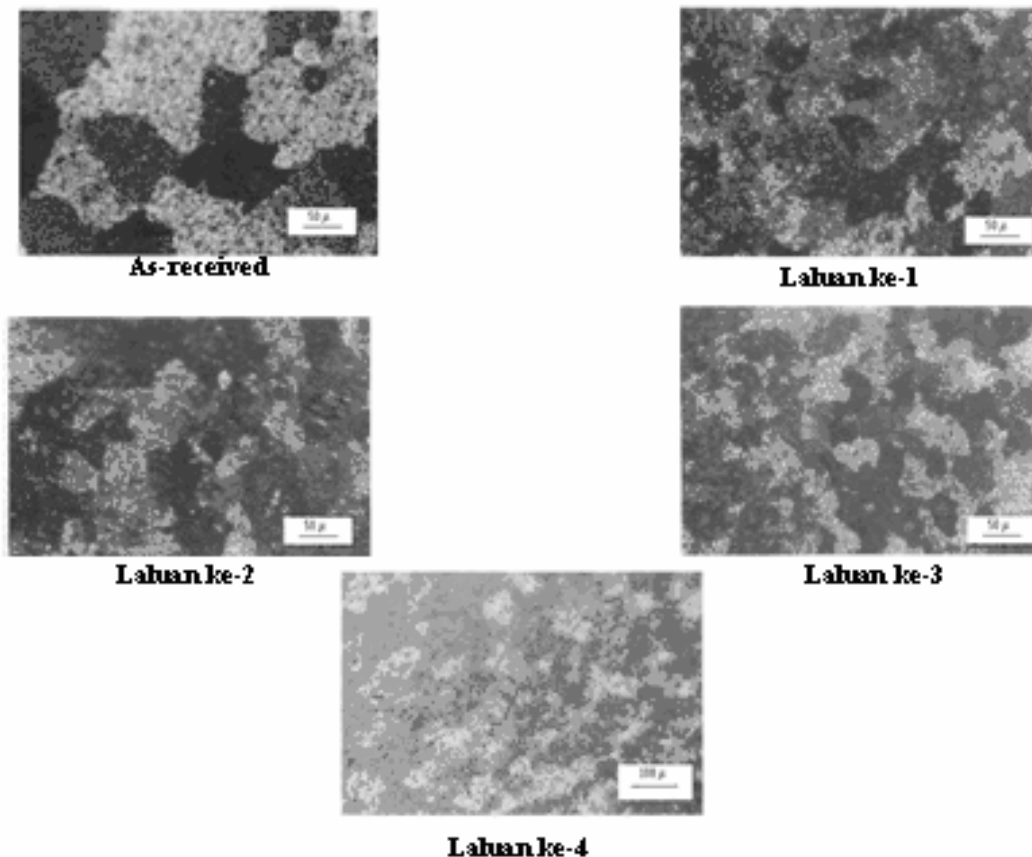
Peneliti sebelumnya dapat menghasilkan ukuran butir sampai sub-mikro bahkan nano [7-23]. Namun ukuran tersebut tidak tercapai pada pengujian ini. Hal ini disebabkan oleh jumlah laluan atau tingkat deformasi masih sedikit. Diperlukan laluan dalam jumlah lebih banyak untuk menghasilkan butir yang lebih halus.

Kaitan antara Strukturmikro dengan Sifat Mekanik

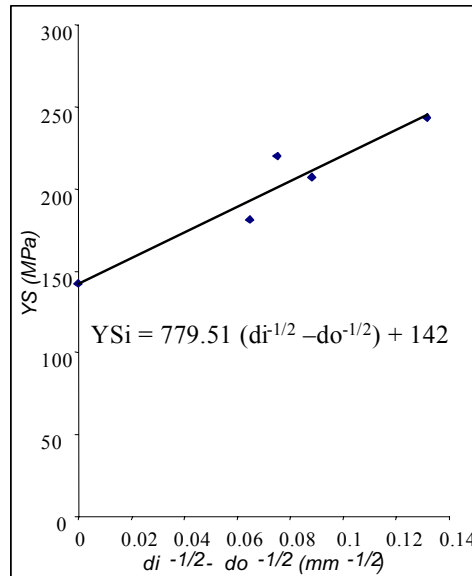
Kaitan antara ukuran butir dan kekuatan luluh bahan diperlihatkan pada Gambar 8. Pendekatan Hall-Petch untuk hubungan ini digambarkan oleh garis linir dalam persamaan [24,25]:

$$Y_{Si} = Y_{So} + \frac{ky}{\sqrt{d_i} - \sqrt{d_o}}$$

$$Y_{Si} = 779.51 (d_i^{-1/2} - d_o^{-1/2}) + 142$$



Gambar 5. Strukturmikro aluminium komersial as-received dan hasil ECAP rute C



Gambar 6. Kurva hubungan YS– $d^{-1/2}$ aluminium komersial hasil ECAP rute C

Menurut persamaan Hall Petch yang menyatakan bahwa harga konstanta k_y merupakan nilai gradien dari persamaan garis lurus tersebut, maka nilai konstanta aluminium hasil ECAP rute C yang diuji tarik dengan laju regangan 4-5 mm/min adalah sebesar 779.51 MPa $\mu\text{m}^{1/2}$ dan simpangan ± 10.5 MPa

Harga k_y ini berada diluar dari range harga yang diusulkan Hasegawa dkk [15] dan Ito [16] yang berkisar pada harga 115 – 126 MPa $\mu\text{m}^{1/2}$, untuk aluminium murni (kelas 1000) yang telah diproses accumulated roll bending, torsion straining maupun ECAP.

KESIMPULAN

Proses ECAP rute C dengan variasi jumlah laluan dilakukan pada Al tanpa paduan. Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah :

1. Proses ECAP mampu meningkatkan kekuatan dan kekerasan bahan secara signifikan.
2. Laluan pertama menghasilkan peningkatan kekuatan dan kekerasan mikro yang paling tinggi, peningkatan ini menurun pada laluan berikutnya.
3. Laluan pertama dan ganjil menghasilkan struktur yang relatif memanjang (elongated) sedangkan laluan kedua dan genap menghasilkan struktur yang relatif *equiaxed*.
4. Peningkatan kekuatan tarik mencapai 70% untuk empat kali laluan.
5. Peningkatan kekerasanmikro mencapai 84% pada bidang melintang dan 74% pada bidang memanjang arah pembebanan.
6. Hubungan kekuatan dan ukuran butir adalah $YS_i = 779.51 (d_i^{-1/2} - d_o^{-1/2}) + 142$

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih banyak kepada Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M), Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI) yang telah membiayai penelitian ini melalui Hibah Penelitian Fundamental dengan nomor kontrak 005/SP3/PP/DP2M/II/2006. Terima kasih kepada sdr Joni Saputra dkk yang telah membantu pelaksanaan penelitian. Terima kasih juga kepada staf dan karyawan Dept. Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology, Jepang yang memberikan advis dan bantuan teknis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Callister, *Materials Science and Engineering*, John Wiley, 1985
- [2] James A Jacobs, Thomas F Kilduff, *Engineering Materials Technology, Structure, Processing, Properties and Selection*, Prentice-Hall Int, 1994
- [3] Smith W.F, *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill, 1996
- [4] Altenpohl D, *Aluminium from within*, Aluminium-Verlag, Dusseldorf, Germany, 1982
- [5] <http://www.metalbulletin.com/>
- [6] R. E. Smallman, *Modern Physical Metallurgy*, Butterworths
- [7] V.M. Segal, *Mater. Sci. Eng. A* 271 (1999) 322.
- [8] Furukawa, M, Horita, Z, Nemoto, M, Langdon, T.G, *Review Processing of Metal by Equal Channel Angular Pressing*, *Journal of Materials Science* 36 (2001) 2835 – 284
- [9] Furukawa M, Zenji Horita, Nemoto M and Langdon T. G., *The Use of Severe Plastic Deformation For Microstructural Control*, *Materials Science and Engineering A*, Volume 324, Issues 1-2, 15 February 2002, Pages 82-89
- [10] Z. Horita, T. Fujinami, M. Nemoto and T. G. Langdon, *Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing*, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 117, Issue 3, 23 November 2001, Pages 288-292
- [11] Kim, H.S., Hong, S. I., Lee, H. R, Chun, B. S, *Process Modeling of Equal Channel Angular Pressing*, *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Edited by Zehedbauer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim, 2004
- [12] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, *Acta Mater.* 46 (1998) 3317.
- [13] L.J. Zheng, H.X. Li, M.F. Hashmi, C.Q. Chen, Y. Zhang, M.G. Zeng, *Evolution of microstructure and strengthening of 7050 Al alloy by ECAP combined with heat-treatment*, *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 100–107
- [14] R. E. Goforth, K. T. Hartwig and L. R. Cornwell, In “*Investigations And Applications Of Severe Plastic Deformation*,” Edited By T. C. Lowe And R. Z. Valiev (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 2000), P. 3.
- [15] Hasegawa H., Komura S., Utsunomiya A., Horita Z, Furukawa M., Nemoto M., Langdon T.G., 1999, *Mater. Sci. Eng. A* 265 hal. 188.
- [16] Ito Y., Tsuji N., Saito Y., Utsunomiya H., Sakai T., 2000, *Jpn. Inst. Met.* 64 hal. 429
- [17] A. Yamashita, Z. Horita, T. G. Langdon, *Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation*, *Materials Science and Engineering A300* (2001) 142–147
- [18] W. J. Kim, C. S. Chung, D. S. Ma, S. I. Hong and H. K. Kim, *Optimization of strength and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging*, *Scripta Materialia*, Volume 49, Issue 4, August 2003, Pages 333-338
- [19] W. Q. Cao, A. Godfrey, W. Liu and Q. Liu, *Annealing behavior of aluminium deformed by equal channel angular pressing*, *Materials Letters*, Volume 57, Issues 24-25, August 2003, Pages 3767-3774
- [20] Bascani P, Tasca L, Vedani M., 2004, *Effect of ECAP Processing on Mechanical and Aging Behaviour of An AA6082 Alloy in Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Edited by Zehetbauer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim.
- [21] Krallics G, Szeles Z, Semenova I.P., Dotsenko T.V., Alexandrov I.V., 2004, *Experimental Investigation of The Al-Mg-Si Alloy Subjected to Equal Channel Angular Pressing, in Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Edited by Zehetbauer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim
- [22] Chang S.Y., Lee K.S., Choi S.H., Shin D.H., 2003, *Journal of Alloys and Compound* 354 hal. 216-220
- [23] Gunawarman, M. Niinomi and T. Akahori, *Effect of severe plastic deformation process using ECAP on microstructure and mechanical properties of β -type titanium alloys for biomedical applications*, *Materials Science and Engineering* 2004, TMS autumn meeting, New Orleans, USA, 26-29 Sept 2004.
- [24] Ilhamdi, *Analysis of Mechanicals Behaviour and Microstructure Development on Comercial Aluminium through ECAP's Processing Route C*, Skripsi S-1, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang, Oktober 2005.
- [25] Joni Syafutra Utama, Skripsi S-1, *Pengaruh Rute Equal Channel Angular Pressing (ECAP) terhadap Kekuatan, Kekerasan dan Strukturmikro Aluminium Komersil*, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang, Oktober 2005.