

# PENGARUH PEMANASAN TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTURMIKRO ALUMINIUM HASIL CETAK-TEKAN (ECAP) RUTE B<sub>C</sub>

**Gunawarman, Jon Affi dan Andre Islah Azhani**

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas

Kampus Limau Manis, Padang 25163

E-mail : gunawarman@ft.unand.ac.id

## ABSTRAK

*Aluminium merupakan material yang memiliki ketahanan korosi yang baik, ringan, dan penampilan menarik. Namun begitu, kekerasan/kekuatan Al relatif rendah sehingga kalah bersaing dengan besi dan paduannya. Untuk mengurangi keterbatasan itu, dilakukan proses penguatan dengan melakukan deformasi plastis menyeluruh terhadap Al. Salah satu metoda yang dapat dilakukan adalah dengan melewati material dalam sebuah cetakan yang mempunyai lorong dalam bentuk huruf L. Proses ini disebut proses cetak-tekan atau lebih dikenal dengan Equal Channel Angular Pressing (ECAP). Pelaksanaan proses cetak-tekan pada Al murni komersil di Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin Unand telah menghasilkan peningkatan kekuatan mencapai 200%. Untuk melihat tingkat kestabilan kekuatan hasil cetak-tekan ini terhadap temperatur perlu dilakukan analisis pengaruh pemanasan terhadap hasil proses, yang dalam hal ini dilakukan untuk rute B<sub>C</sub>. Rute ini dipilih karena kekuatan yang dihasilkan paling tinggi dibandingkan rute A dan C, seperti yang diperoleh pada penelitian terdahulu.*

*Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan material hasil proses cetak-tekan relatif stabil sampai temperatur 135<sup>0</sup>C seperti yang ditunjukkan oleh hasil pengujian kekerasan material. Kekuatan material menurun drastis di atas temperatur 135<sup>0</sup>C. Hal ini disebabkan terutama oleh perubahan struktur mikro terutama pengasaran butir material seperti yang ditunjukkan oleh pengamatan metalografi dengan mikroskop optik. Hasil penelitian merekomendasikan pemakaian material hasil cetak-tekan ini hanya untuk temperatur yang tidak terlalu agar peningkatan kekuatan oleh proses cetak-tekan tidak hilang karena perubahan struktur mikro.*

*Kata Kunci: Cetak-tekan, Aluminium, ECAP, Sifat Mekanik, Temperatur*

## I. PENDAHULUAN

Seperti diketahui harga logam dunia terus menunjukkan peningkatan yang berarti beberapa tahun belakangan ini. Hal ini disebabkan terutama oleh tingginya kebutuhan logam dunia sementara persediaan di alam terus menurun. Oleh karena itu, perlu dilakukan penghematan, yang salah satu caranya adalah dengan meningkatkan kekuatan material sehingga volume dan tonase penggunaannya dapat lebih direduksi seminimal mungkin. Peningkatan kekuatan mendesak dilakukan terutama untuk logam teknik yang banyak digunakan namun kekuatan rendah seperti Aluminium (Al). Dengan kekuatan yang tinggi Al akan dapat lebih menguntungkan digunakan dibandingkan Besi dan Baja karena mempunyai kelebihan penting lain yakni tahan korosi dan penampilan menarik. Ketahanan korosi yang baik akan menurunkan secara drastis biaya perawatan untuk pengendalian korosi.

Dalam dua dekade terakhir ini, beberapa usaha telah dilakukan oleh peneliti untuk meningkatkan kekuatan logam. Metoda terbaru yang banyak diteliti belakangan ini adalah penguatan material melalui pemberian deformasi plastis menyeluruh (severe plastic deformation). Metoda deformasi plastis

menyeluruh yang paling menjanjikan untuk diterapkan di dunia industri adalah proses equal channel angular pressing (ECAP) atau diterjemahkan secara singkat sebagai proses cetak-tekan saja. Deformasi yang besar diperoleh dengan memaksa material melewati alur (lorong) cetakan berbentuk huruf L. Proses ini dapat menghasilkan peningkatan kekuatan mencapai 200% untuk Aluminium (Al) murni dan Tembaga (Cu) murni sebagai akibat pembentukan butir (grain) yang halus dengan orde sub-mikrometer dan bahkan nanometer [1-15]. Peningkatan kekuatan sebesar ini dapat disebut sangat tinggi untuk logam murni, karena proses penguatan konvensional, yakni proses pengerjaan dingin hanya dapat meningkatkan kekuatan logam murni kurang dari 100%.

Namun demikian beberapa penelitian lanjutan masih perlu dilakukan terhadap proses cetak-tekan ini sebelum diterapkan di lapangan. Salah satunya adalah perlu dilihat tingkat kestabilan penguatan terhadap pengaruh temperatur. Karena, bagaimanapun, aplikasi material di Industri akan mengalami perubahan temperatur, baik oleh perubahan temperatur lingkungan maupun oleh gesekan. Oleh karena itu, adalah penting untuk mengkaji perubahan sifat mekanik dan struktur mikro yang terjadi pada logam hasil cetak-tekan

akibat pengaruh temperatur tersebut. Pada penelitian ini, objek adalah Al murni yang dikuatkan dengan proses cetak-tekan rute Bc. Rute ini dipilih karena kekuatan yang dihasilkan paling tinggi dibandingkan rute A dan C, seperti yang diperoleh pada penelitian terdahulu.

## II. BAHAN DAN METODOLOGI PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah batangan Aluminium berpenampang sekitar 10 x 10 cm yang umum terdapat di pasaran. Pengecekan komposisi kimia dengan EDX menunjukkan bahwa komposisi adalah 98.37 % Al - 1.63 % Mg (%.wt). Hal ini berarti bahan tergolong Al kelas 1100 yakni kelompok Al murni komersil.

Sebelum proses cetak-tekan dilakukan, maka dilakukan modifikasi cetakan terhadap alat cetak-tekan terdahulu agar lorong cetakan dapat menampung sampel sesuai dengan ukuran sampel tersebut diatas. Cetakan yang terbuat dari material *tool steels* mempunyai sudut alur cetakan  $\Phi=90^\circ$  dan sudut lengkung cetakan  $\Psi=20^\circ$ . Alat cetak-tekan yang digunakan pada pengujian kali ini dimodifikasi dari alat cetak-tekan yang digunakan oleh peneliti sebelumnya. Perbedaannya, cetakan yang dipakai pada pengujian ini tidak memakai inti cetakan (cetakan langsung). Sedangkan pengujian sebelumnya, cetakan memakai inti cetakan. Alat cetak terdiri dari 2 pelat baja setebal 2". Saluran cetakan hanya terdapat pada satu bagian cetakan saja dan pertemuan antara dua saluran tersebut membentuk sudut siku. Dua bagian cetakan yang terpisah digabungkan dengan menggunakan beberapa buah baut sebagai pengikat dan pin sebagai penahan.

Untuk membuat sampel proses cetak-tekan, batangan aluminium dipotong sepanjang 60 mm dengan menggunakan gergaji besi. Selain itu, sebagian sisa material dipotong sepanjang lebih kurang 15 mm untuk menguji sifat mekanik dan struktur mikro bahan pada kondisi diterima (*as-received*) atau sebelum perlakuan.

Proses cetak-tekan dilakukan dengan memanfaatkan gaya penekanan pada mesin uji jenis universal testing machine yang umum digunakan untuk pengujian tarik material. Foto pelaksanaan pengujian diperlihatkan pada Gambar 1.

Pelaksanaan proses cetak-tekan dilakukan, pertama, adalah menyiapkan mesin uji dan segala komponen pengujian ECAP (penekan, cetakan dan ragam). Pemasangan penekan (*punch/plunger*) dilakukan pada pemegang yang terdapat pada mesin uji sedangkan cetakan diletakkan dan dijepit pada ragam (*dies*). Sebelum pengujian dimulai, dilakukan pemanasan pada kedua alur cetakan untuk mengurangi gesekan dan pemanasan yang terjadi selama pengujian. Kemudian proses centering (*penyesuaian sumbu antara penekan pada lubang penekanan*). Setelah penekan dan alur cetakan sesuai, posisi penekan dikembalikan pada posisi

semula. Sesimen uji lalu dimasukkan kedalam alur cetakan dan seterusnya dilakukan pembebanan dengan membuka katup beban perlahan-lahan. Setelah spesimen keluar dari cetakan, prosedur diulangi dari awal dengan memutar spesimen sebesar  $90^\circ$  searah jarum jam sampai 3 (tiga) kali laluan. Proses penekanan ini dilakukan secara berulang untuk menghasilkan proses deformasi yang besar.

Setelah proses cetak-tekan selesai dilakukan maka dilakukan pengujian kekerasan mikro pada tiap sampel masing-masing sebanyak 7 titik. Yang pertama, pengujian kekerasan pada aluminium *as-received*. Kedua, untuk sampel setelah dicetak-tekan, dan ketiga, pengujian kekerasan terhadap sampel setelah pemanasan dengan temperatur yang bervariasi. Pengujian kekerasan kali ini menggunakan alat uji Shimadzu Micro Hardness Tester. Sistem pengoperasian otomatis dengan menggunakan intan piramida sebagai indenter. Hasil dari pembebanan akan menghasilkan jejak lekukan berbentuk belah ketupat yang dapat diukur langsung pada mesin uji. Hasil dari pengukuran tersebut akan menghasilkan nilai kekerasan aluminium yang diukur. Pengujian dilakukan pada lima titik penekanan. Beban yang digunakan pada pengujian adalah 490,3 mN dengan waktu pembebanan selama 15 detik.



Gambar 1 Pelaksanaan proses Cetak-Tekan Al

Kemudian, setelah kekerasan sampel *as-received* dan setelah ECAP diukur kekerasannya, masing-masing sampel dipotong-potong melintang (*bidang yang tegak lurus dengan arah pembebanan*) menjadi empat bagian dengan ukuran yang relatif sama. Setelah diukur kekerasannya, masing-masing sampel yang telah dipotong tadi dipanaskan pada temperatur yang berbeda yaitu,  $135^\circ$ ,  $165^\circ$  dan  $200^\circ\text{C}$ . Pemanasan material dilakukan pada rentang temperatur rekristalisasi agar dapat dilihat pengaruh pemanasan terhadap struktur material yang nantinya akan berpengaruh terhadap sifat mekanik material itu sendiri, khususnya terhadap nilai kekerasan. Pemanasan dilakukan dengan tungku pemanas selama 30 menit, kemudian dilakukan holding

selama 10 menit quenching dengan media pendingin oli.

Untuk melihat struktur mikro bahan dilakukan pengamatan metalografi. Penyiapan sampel dilakukan menurut prosedur umum yang berlaku. Pengetsaan dilakukan dengan mencelupkan spesimen kedalam larutan etsa berupa larutan *Poulton reagent* + 25 ml HNO<sub>3</sub> + 40 ml + 3 gram chromic acid per 10 ml H<sub>2</sub>O. Lama pengetsaan 1– 4 menit, kemudian dicuci dengan air hangat dan dikeringkan. Pengamatan dilakukan dengan mikroskop optik.

### III.HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan untuk tiap laluan yang dilakukan pada tujuh titik yang berbeda pada bidang pengukuran yang sama, yaitu bidang bidang lintang diperlihatkan pada Tabel 1.

**Tabel 1** Hasil pengujian kekerasan sebelum dan sesudah cetak-tekan

| Sampel      | HV min | HV rata-rata | HV max | deviasi |
|-------------|--------|--------------|--------|---------|
| As-received | 67     | 72           | 84     | 5       |
| 1x laluan   | 82     | 95           | 122    | 13      |
| 2x laluan   | 82     | 98           | 109    | 9       |
| 3x laluan   | 72     | 81           | 100    | 10      |

Dari Tabel terlihat bahwa kekerasan aluminium terus meningkat dengan meningkatnya jumlah laluan, kecuali untuk laluan 3. Besarnya peningkatan yang terjadi adalah sebesar 32% untuk laluan pertama, 35% untuk laluan kedua dan 13% untuk laluan ketiga, bila dibandingkan dengan kekuatan awal (as received).

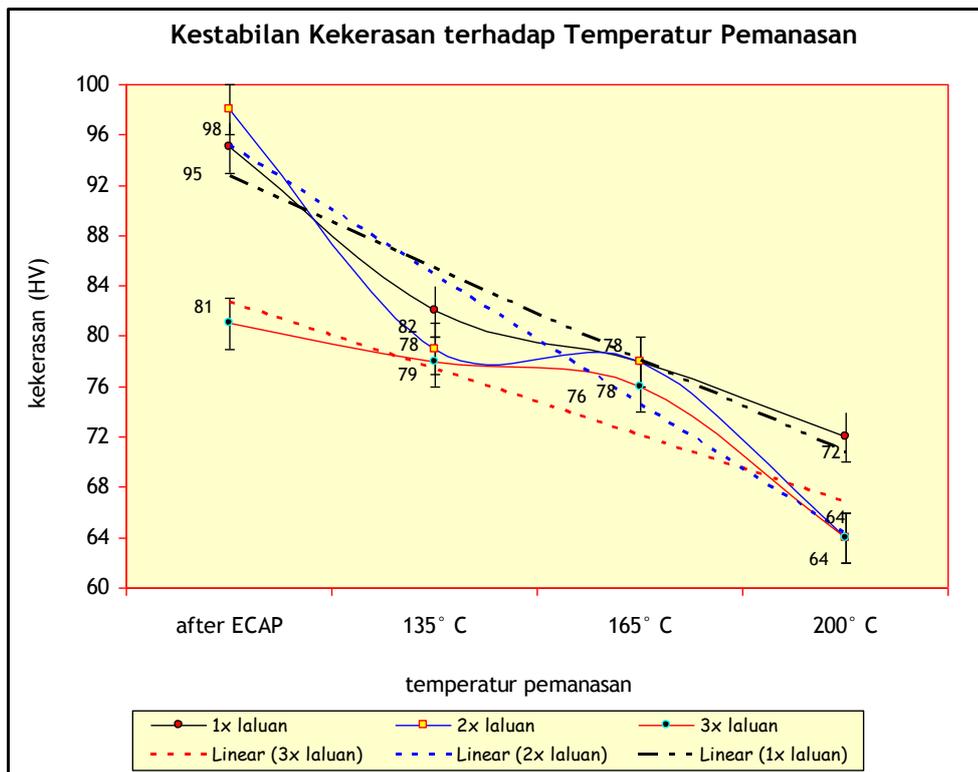
Apabila dibandingkan dengan pengujian yang dilakukan oleh Horita *et al* [15], hasil yang didapatkan ini agak berbeda. Perbedaan ini adalah hal yang wajar karena banyak faktor yang mempengaruhi struktur mikro hasil proses cetak-tekan, diantaranya adalah variabel proses, langkah proses, geometri cetakan dan juga sifat dasar dari material itu sendiri. Pada penelitian yang dilakukan Horita, material yang dipakai adalah Aluminium Paduan sedangkan material yang digunakan pada pengujian disini adalah Aluminium Murni.

Peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan oleh peningkatan jumlah dislokasi dan pengerasan regangan (strain/work hardening) yang terjadi pada struktur material sebagai efek dari pengerjaan dingin. Pada proses ini, dislokasi-dislokasi bergerak dan bertumpuk pada batas butir. Dislokasi-dislokasi tersebut masih memiliki energi regangan internal yang cukup tinggi sehingga mengakibatkan energi pada batas butir meningkat.

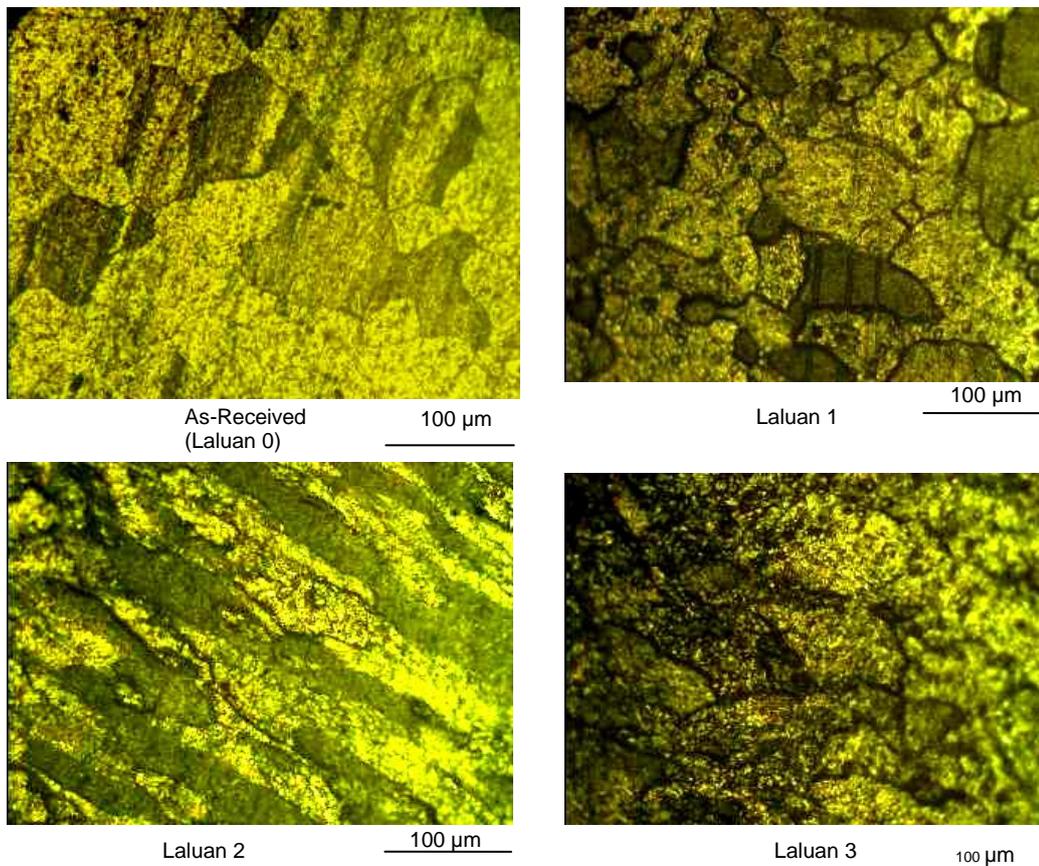
Pengaruh pemanasan terhadap kekerasan Al hasil proses cetak-tekan diperlihatkan pada Gambar 2. Dari Gambar terlihat jelas bahwa kekerasan Aluminium hasil proses cetak-tekan menurun seiring dengan peningkatan temperatur pemanasan. Penurunan yang drastis terjadi pada temperatur 165<sup>o</sup>C dan 200<sup>o</sup>C, yaitu mencapai kekerasan pada kondisi *as-received* (sebelum proses cetak-tekan) atau kembali pada keadaan awal. Hal ini disebabkan oleh proses *recovery* dan rekristalisasi yang terjadi pada rentang temperatur tersebut. Pada proses ini, terjadi pembebasan energi pada internal pada dislokasi dan pengurangan jumlah dislokasi itu sendiri. Ukuran butir pada material meningkat sehingga nilai kekerasan material menurun. Sedangkan untuk temperatur pemanasan 135<sup>o</sup>C, penurunan kekerasan tidak terlalu signifikan atau dengan kata lain kekerasan aluminium hasil ECAP rute B<sub>C</sub> masih stabil.

#### 3.2 Karakteristik Struktur Mikro

Karakteristik struktur mikro material hasil proses cetak-tekan diperlihatkan pada Gambar 3. Dari Gambar terlihat bahwa diameter butir aluminium *as-received* berukuran besar dan berbentuk *equiaxed*. Dengan metode *point counting* didapatkan diameter butir rata-rata sebesar 125 μm. Setelah diproses cetak-tekan 1 kali laluan terjadi penurunan ukuran butir menjadi 73 μm. Bila dibandingkan dengan sebelum ECAP, terjadi reduksi ukuran butir sebesar 71 %. Untuk Al setelah ECAP dengan dua kali laluan terjadi perpanjangan butir yang cukup jelas. Pada 2x laluan ini, orientasi butir berubah dari *equiaxed* menjadi *elongated* dengan ukuran diameter rata-rata butir 57 μm. Terjadi reduksi ukuran butir sebesar 28 % apabila dibandingkan dengan material tahap proses pertama. Hal tersebut akan berpengaruh terhadap kekerasan bahan sesuai dengan hukum Hall-Petch.



Gambar 2 Kestabilan nilai kekerasan terhadap pengaruh temperatur pemanasan

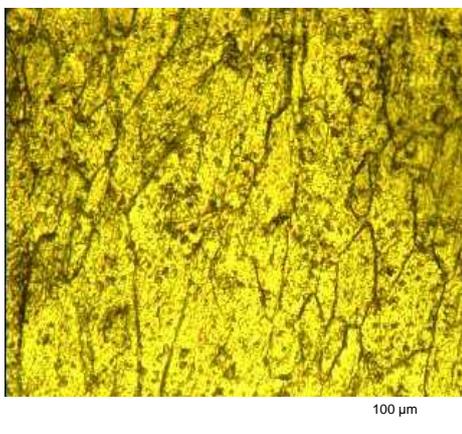
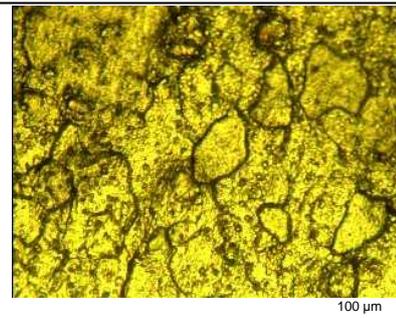


Gambar 3 Struktur mikro hasil proses cetak-tekan untuk tiap laluan

Pada laluan ketiga, perpanjangan butir tidak terlihat jelas. Butir-butir cenderung berubah kembali menjadi *equiaxed* dengan ukuran butir 74  $\mu\text{m}$  atau sedikit bertambah besar bila dibandingkan dengan ukuran butir pada 2x tahap proses.

Proses pemanasan yang diberikan terhadap sampel setelah 1-3 kali laluan, memperlihatkan perubahan struktur mikro seperti Gambar 4. Setelah pemanasan pada temperatur 135 $^{\circ}\text{C}$  untuk 1 kali laluan, butir terlihat sedikit membesar dibandingkan dengan butir aluminium sebelum pemanasan untuk jumlah laluan yang sama. Ukuran butir rata-rata adalah menjadi 90  $\mu\text{m}$ , dan orientasi butir masih tetap sama. Sementara itu, terlihat bahwa butir makin kasar dengan naiknya temperatur pemanasan. Untuk 165 $^{\circ}\text{C}$  ini, terlihat struktur butir cenderung *equiaxed* dengan ukuran butir rata-ratanya 66  $\mu\text{m}$  pada laluan tiga. Akibat pemanasan pada temperatur 200 $^{\circ}\text{C}$ , terlihat bahwa ukuran butir membesar dengan ukuran butir rata-rata 91  $\mu\text{m}$ .

Hasil pengujian struktur mikro pada bidang melintang ini menunjukkan bahwa proses cetak-tekan sangat efektif untuk menghaluskan butir. Pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dan pada gambar tersebut terlihat bahwa butir setelah proses mengalami perpanjangan dibandingkan dengan butir pada material sebelum proses. Perpanjangan struktur butir tidak terlalu terlihat pada struktur mikro laluan pertama. Dengan kata lain penghalusan butir dengan cara memperbanyak batas butir terjadi pada laluan pertama ini. Hal ini terjadi karena adanya pemecahan butir dalam jumlah yang banyak sesuai dengan penelitian Ilhamdi dkk [13]. Sedangkan untuk laluan ke-2, struktur butir mengalami perpanjangan yang cukup signifikan apabila dibandingkan dengan laluan pertama. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh W.Q Cao *et al* [12]. Sementara itu untuk 3x laluan, perpanjangan butir tidak terjadi karena pemutaran sampel diantara langkah proses sebesar 90 $^{\circ}$  searah sumbu longitudinal yang mengakibatkan struktur butir menjadi memendek sehingga menjadi sedikit *equiaxed* bila dibandingkan dengan 2x laluan.

Pemanasan 135 $^{\circ}\text{C}$ Pemanasan 165 $^{\circ}\text{C}$ 

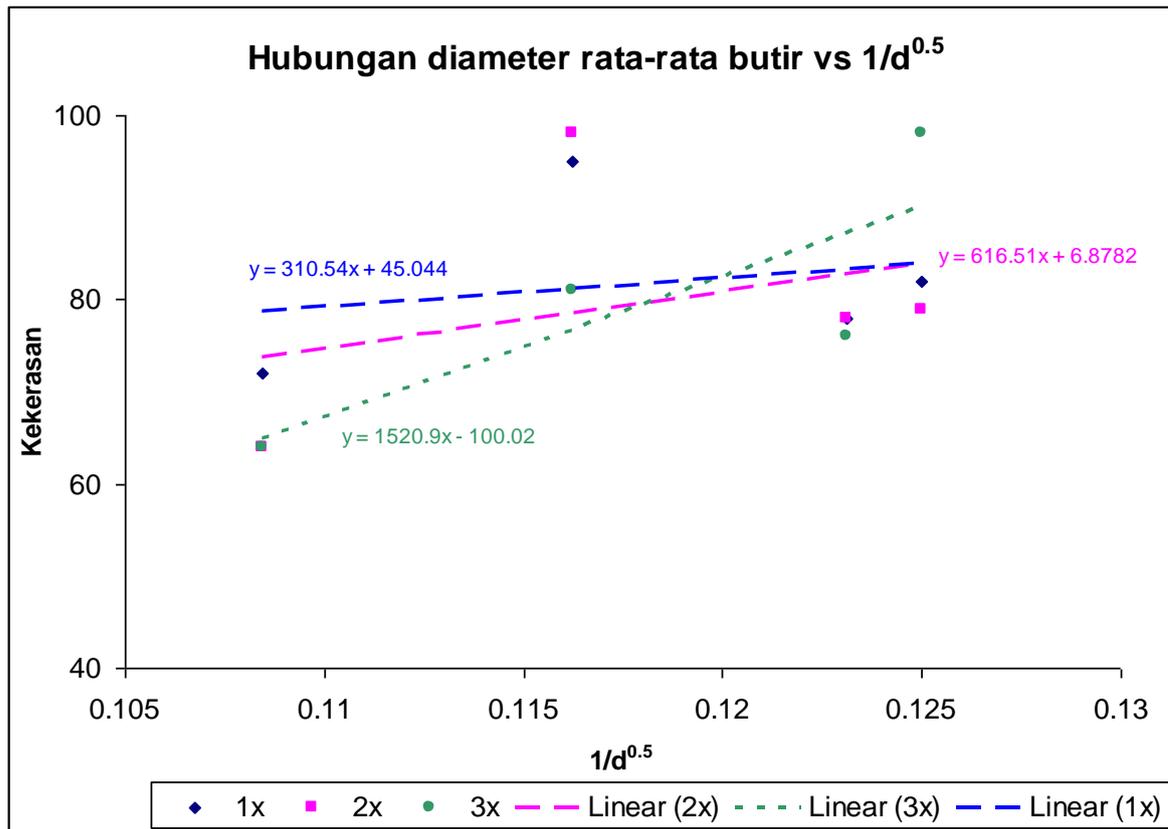
**Gambar 4** Efek pemanasan terhadap struktur mikro sampel

### 3.3 Hubungan antara Kekerasan, Struktur mikro dan Temperatur Pemanasan

Sifat mekanik yang diperoleh berkaitan erat dengan struktur mikro yang dihasilkan proses cetak-tekan. Karena itu, perubahan kekerasan material akibat proses cetak-tekan berhubungan erat dengan perubahan ukuran butir Al selama proses. Material yang telah melalui proses ECAP kemudian dipanaskan pada tiga variasi temperatur, yaitu 135 , 165 , dan 200 $^{\circ}\text{C}$ . Pemanasan ini bertujuan untuk melihat kestabilan sifat mekanik dan struktur mikro dari aluminium setelah proses cetak-tekan. Setelah dilakukan pemanasan, pengujian mekanik kembali dilakukan, dimana perubahan nilai kekerasan diperlihatkan pada Gambar 2. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai kekerasan aluminium untuk masing-masing laluan cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan temperatur pemanasan. Penurunan ini berkisar antara 13 s/d 24 %. Penurunan kekerasan paling besar untuk masing-masing laluan terjadi pada range temperatur 165–200 $^{\circ}\text{C}$ . Hal ini disebabkan oleh terjadinya pembebasan energi dislokasi yang cukup besar pada rentang temperatur ini. Dislokasi-dislokasi ini merupakan penyebab dari peningkatan kekerasan material setelah proses. Hal ini berkaitan erat dengan proses *recovery* dan rekristalisasi pada struktur material. Proses rekristalisasi yang terjadi merupakan rekristalisasi statik, karena pemanasan material dilakukan setelah pengerjaan dingin.

Struktur butir pada temperatur pemanasan 200 $^{\circ}\text{C}$  butir menjadi lebih kasar apabila dibandingkan dengan struktur butir dengan temperatur pemanasan 135 $^{\circ}\text{C}$  dan 165 $^{\circ}\text{C}$ . Ini disebabkan oleh adanya subbutir baru yang tumbuh pada batas butir sebagai akibat dari pemanasan yang dilakukan pada temperatur rekristalisasi ( $T_{\text{rek}}$  aluminium  $\pm$  185  $^{\circ}\text{C}$ ). Hal ini menyebabkan kekerasan material menurun, dalam kasus ini penurunan yang terjadi cukup signifikan hingga mencapai kekerasan awal sebelum proses cetak tekan bahkan lebih rendah.

Apabila diambil suatu hubungan antara diameter rata-rata butir dengan sifat mekanik, dalam hal ini yaitu kekerasannya, merujuk pada persamaan *Hall-Petch* didapatkan hubungan seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Hubungan kekerasan dan ukuran butir Al

Dari Gambar terlihat bahwa nilai kekerasan itu sebanding dengan  $d^{-1/2}$  dari butir. Sebagaimana dibahas di atas bahwa ukuran butir setelah pemanasan meningkat seiring peningkatan temperatur pemanasan, dan ini berakibat terhadap penurunan nilai kekerasan. Apabila dihubungkan dengan persamaan *Hall-Petch* yang biasa digunakan untuk memprediksi kekuatan luluh material polikristal, trend grafik diatas sudah menggambarkan hubungan tersebut karena hubungan antara kekerasan dengan kekuatan adalah sebanding.

Berdasarkan penelitian ini, dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa nilai kekerasan Al setelah proses cetak-tekan akan cenderung menurun seiring dengan peningkatan temperatur. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Cao, W.Q [11], dimana kekerasan Al murni setelah dicetak-tekan menurun seiring dengan peningkatan temperatur anil, penurunan yang cukup tinggi terjadi pada rentang temperatur 185 – 240°C. Kekerasan Al terlihat setelah proses cetak-tekan cukup stabil sampai temperatur 135°C, karena pada temperatur tersebut struktur Al belum mengalami perubahan yang cukup berarti.

#### IV. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian pengaruh pemanasan terhadap kekuatan dan struktur Al hasil proses cetak-tekan rute Bc adalah sebagai berikut :

1. Kekerasan aluminium komersil mengalami peningkatan setelah dilakukan proses cetak-tekan sampai dengan 2x laluan sedangkan untuk laluan ke-3 mengalami sedikit penurunan.
2. Peningkatan kekerasan setelah cetak-tekan 32% untuk laluan pertama, 35 % untuk laluan ke-2 dan 13% untuk laluan ke-3.
3. Perubahan struktur mikro setelah cetak-tekan cukup signifikan apabila dibandingkan dengan keadaan awal sebelum proses. Perpanjangan butir cukup jelas terlihat setelah 2x laluan, sedangkan untuk 1x dan 3x laluan perpanjangan butir terlihat kurang jelas.
4. Nilai kekerasan aluminium setelah cetak-tekan cukup stabil sampai temperatur 135°C. Sedangkan pada temperatur 165°C dan 200°C terjadi penurunan drastis.
5. Penurunan kekuatan akibat pemanasan berkorelasi positif dengan peningkatan diameter butir akibat pemanasan bahan sesuai dengan hukum *Hall-Petch*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih banyak kepada Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DP2M), Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI) yang telah membiayai penelitian ini melalui Penelitian Hibah Bersaing tahun kedua dengan kontrak no. 005/SP2H/PP/DP2M/III/2008 tanggal 6 Maret 2008.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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 – 2843
- [2] Kim, H.S., Hong, S. I., Lee, H. R, Chun, B. S, in *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Edited by Zehedbauer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim, 2004
- [3] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, *Acta Mater.* 46 (1998) 3317
- [4] Lee, Sungwon, Berbon P.B, et all, *Developing Superplastic Properties in An Aluminium Through Severe Plastic Deformation*, Material Science and Engineering A272 (1999) 63-72
- [5] R. E. Goforth, et al in “*Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation*,” edited by T. C. Lowe and R. Z. Valiev (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 2000), p. 3.
- [6] S.J. Oh, S.B. Kang *Process Modeling of Equal Channel Angular Pressing*, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Edited by Zehedbauer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim, 2004
- [7] Pluth, M, *Mechanical Properties of Consolidated Metal Nanopowder*, Nanopowder Rewrite, 2002
- [8] Brady, George, Hendry, R.C., *Materials handbook; An Encyclopedia for Manager, Technical Professional, Purchasing and Production Managers, Technician, Supervisor, and Foremen*, 11<sup>th</sup> Edition, Mc.Graw Hill Book Company, New York, 1979
- [9] Parker, E.R., *Materials Data Handbook for Engineers and Scientists*, Mc.Graw Hill Book , NY, 1967
- [10] Horita, Z, Fujinami, T, Nemoto, M, Langdon, T.G, *Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal Channel Angular Pressing*, Journal of Mat Processing Technology 117 (2001) 288-292.
- [11] Cao, W.Q, Godfrey, A, Liu, Q. *EBSF investigation of microstructure and texture evolution during equal channel angular pressing of aluminium*. J. of Mat Processing Technology A361 (2003) 9– 14.
- [12] Nakashima, Kyotak, Horita, Zenji, Nemoto, Minoru, Langdon, T.G. *Development of a multipass facility for Equal Channel Angular Pressing to high strain*. Journal of material science and engineering. A281 (2000) 82-87
- [13] Ilhamdi. *Analisa Perubahan Sifat Mekanik dan Strukturmikro Aluminium Komersil yang diproses dengan ECAP Rute B<sub>C</sub>*. Skripsi, Fakultas Teknik Universitas Andalas. 2005.
- [14] E.O.Hall, Proc.Roy.Soc. B 64 (1951) 747
- [15] Z. Horita, Y. Iwahashi M. Nemoto, T.G. Langdon, *Acta Mater.* 46 (1998) 33.