

## Kontribusi Proses Pengerolan Terhadap Penguatan Aluminium dan Pembentukan Struktur Nano Pasca Proses Cetak-Tekan (ECAP)

**Gunawarman<sup>1</sup>, Adam Malik<sup>1</sup> dan Hendra Suherman<sup>2</sup>**

1. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang 25163. E-mail. [gunawarman@ft.unand.ac.id](mailto:gunawarman@ft.unand.ac.id)
2. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Kampus III Gunung Pangilun, Jl. Gajah Mada, Padang

### *Abstract*

*Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh proses pengerolan dingin terhadap sifat mekanik dan struktur mikro Alumunium yang telah diproses terlebih dahulu dengan proses cetak-tekan melalui lorong bersudut dan berpenampang sama (Equal Channel Angular Pressing, ECAP). Sifat mekanik yang diukur antara lain kekuatan, kekerasan, dan keuletan bahan. Struktur mikro yang diperiksa terutama ukuran butir menggunakan mikroskop optik digital.*

*Penelitian dilakukan terhadap Al murni komersil produksi dalam negeri dengan memvariasikan jumlah laluan sampai dengan 4 laluan pada proses cetak-tekan menggunakan cetakan ECAP dengan sudut lorong 90° (siku), dimana setiap laluan memberikan regangan sekitar 100%. Rute yang digunakan adalah rute A, yakni sebuah rute yang mampu memberikan peningkatan kekuatan tertinggi pada Al sesuai dengan penelitian terdahulu. Proses pengerolan dingin bertahap sampai tingkat reduksi maksimum kemudian diterapkan pada sampel-sampel hasil cetak-tekan tiap laluan. Sejumlah spesimen uji diambil dari masing-masing sampel sebelum dan setelah pengerolan untuk mengetahui sifat mekanik dan struktur mikro Al tersebut. Sifat mekanik logam ditentukan dengan pengujian tarik dan pengujian keras, sementara pemeriksaan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik.*

*Hasil penelitian menunjukkan bahwa, proses cetak-tekan (ECAP) saja menghasilkan peningkatan kekuatan Al sebesar 40% untuk laluan pertama, 37% untuk laluan kedua, 44% untuk laluan ketiga dan 57% untuk laluan keempat. Begitu juga nilai kekerasan, terjadi peningkatan 20% untuk laluan pertama, 27% untuk laluan kedua, 30% untuk laluan ketiga dan 58% untuk laluan keempat. Penerapan proses pengerolan dingin setelah proses cetak-tekan ternyata mampu meningkatkan kekuatan sebesar 52% untuk laluan pertama, 42% untuk laluan kedua, 54% untuk laluan ketiga dan 78% untuk laluan keempat. Sementara untuk kekerasan, diperoleh peningkatan 28% untuk laluan pertama, 58% untuk laluan kedua, 66% untuk laluan ketiga dan mencapai 100% untuk laluan keempat. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa, ukuran rata-rata butir setelah proses cetak-tekan menjadi lebih halus dibandingkan ukuran butir awal. Proses pengerolan membuat ukuran butir menjadi hanya sedikit lebih halus dari pada ukuran rata-rata butir setelah proses cetak-tekan saja. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kontribusi proses pengerolan dingin terhadap penguatan Al cukup signifikan. Sementara itu, kontribusi proses pengerolan terhadap pembentukan struktur sub-mikro/nano hampir tidak ada. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan pada proses pengerolan dingin didominasi oleh efek pengerasan regangan.*

*Kata Kunci : Cetak-tekan (ECAP), Aluminium, Pengerolan Dingin (Cold Roll), Kekuatan (Strength), Struktur Nano*

### **I. Pendahuluan**

Kebutuhan teknologi material belakangan ini mengarah kepada pengembangan material ringan dan kuat, dengan mampu bentuk yang tinggi, dan komposisi kimia yang sederhana. Hal ini dipicu oleh meningkatnya

harga bahan bakar dan keterbatasan persedian logam. Keterbatasan persediaan logam memicu penghematan penggunaan logam, sehingga cara pemanfaatan logam untuk meningkatkan kekuatannya pada saat ini menjadi kurang efektif. Cetak-tekan atau *Equal Channel Angular*



Pressing (ECAP) hadir sebagai metode penguatan material yang paling menjanjikan pada saat sekarang ini [1-7]. Proses ini dapat memberikan peningkatan kekuatan yang sangat signifikan tanpa perubahan yang berarti pada sifat fisik material.

Penelitian sebelumnya [8] menunjukkan bahwa proses Cetak-tekan rute A telah terbukti memberikan peningkatan sifat mekanik pada Aluminium komersil (sekitar 99% Al). Aluminium komersil ini termasuk logam murni (*pure metal*) yang merupakan logam dengan komposisi sederhana. Logam ini ringan dan kekuatannya rendah. Namun, untuk lebih meningkatkan kekuatan dan kekerasan Aluminium dilakukan proses lanjutan yaitu proses penggerolan dingin yang menyebabkan aluminium tersebut mengalami pengerasan regangan. Hal ini berguna untuk aplikasi produk plat aluminium pada industri otomotif dan rumah tangga.

## II. Bahan dan Prosedur Pengujian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah batangan Aluminium produksi PT Inalum, Asahan berpenampang sekitar 10 x 10 cm yang banyak tersedia di pasaran. Pengecekan komposisi kimia dengan EDX menunjukkan bahwa komposisi adalah 98.37 % Al - 1.63 % Mg (%.wt).

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 proses Cetak-tekan dibuat dari material *tool steel* dengan sudut alur cetakan sebesar 90°. Setiap laluan ini memberikan regangan sekitar 100% [4]. Cetakan yang dipakai pada pengujian ini tidak memakai inti cetakan (cetakan langsung). Cetakan ini memiliki dua bagian yang terpisah, dua bagian yang terpisah ini digabungkan dengan menggunakan baut sebagai penahan. Cetakan ini menggunakan sudut dalam pada lengkungan terluar dimana dua saluran bersilangan. Selanjutnya, dilakukan pemasangan blok penuntun *plunger* agar posisi *plunger* tepat pada alur cetakan dan setelah proses Cetak-tekan, *plunger* dapat terlepas langsung dari cetakan. Dengan adanya penuntun *plunger* ini efektifitas kerja dalam proses Cetak-tekan dapat ditingkatkan dengan mereduksi waktu mengeluarkan *plunger* dari cetakan.

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.

Proses Cetak-tekan dilakukan pada temperatur kamar dan dilakukan penekanan menggunakan rute A sampai 4x laluan. Proses ini pertama-tama adalah setelah mesin disiapkan dengan segala perlengkapannya (penekan, cetakan, dan blok penuntun). Pemasangan *punch* dilakukan pada blok penuntun *plunger*. Setelah *punch* dipasang, cetakan diletakkan pada blok penuntun. Sebelum pengujian dimulai, dilakukan pelumas pada pada kedua alur cetakan untuk mengurangi gesekan dan panas yang terjadi selama pengujian. Kemudian proses *centering* (penyesuaian penekan pada lubang penekan). Setelah penekan dan cetakan sesuai, posisi penekan dikembalikan pada posisi semula. Kemudian Aluminium dimasukkan ke dalam cetakan dan penekanan dilakukan dengan membuka katup beban perlahan-lahan. Setelah spesimen keluar dari cetakan, prosedur diulangi dari awal dengan memutar spesimen sebesar 0° sampai 4x laluan.

Setelah proses cetak-tekan selesai dilakukan maka dilakukan pengujian kekerasan mikro pada tiap sampel masing-masing sebanyak 5 titik. Yang pertama, pengujian kekerasan pada alumunium *as-received*. Kedua, untuk sampel setelah dicetak-tekan, dan ketiga, pengujian kekerasan terhadap sampel setelah proses kombinasi Cetak-tekan-Pengerolan. Pengujian kekerasan kali ini menggunakan alat uji Shimadzu Micro Hardness Tester. Sistem pengoperasian otomatis dengan menggunakan intan piramida sebagai indentor. Hasil dari pembebahan akan menghasilkan jejak lekukan berbentuk belah ketupat yang dapat diukur langsung pada mesin uji. Hasil dari pengukuran tersebut akan menghasilkan nilai kekerasan alumunium yang diukur. Pengujian dilakukan pada lima titik penekanan. Beban yang digunakan pada pengujian adalah 490,3 mN dengan waktu pembebahan selama 15 detik. Kemudian, dilakukan pengujian tarik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan aluminium sebelum dan setelah melalui rute proses Cetak-tekan dan setelah penggerolan. Pengujian tarik ini dilakukan dengan kecepatan 10 mm/menit dan dilengkapi dengan *software* C-TAP.





*Gambar 1. Proses Cetak-tekan Al*

Setelah itu, dilakukan proses penggerolan dingin pada sampel *as-received* dan sampel yang telah dilakukan proses Cetak-tekan, kemudian dilakukan penggerolan dengan mesin roll secara bertahap dan berulang-ulang dengan cara mengatur tingkat reduksi ketebalan yang terdapat pada mesin dengan cara memutarnya sampai spesimen mencapai ketebalan minimum. Setelah proses penggerolan dingin ini berakhir akan menghasilkan plat Al.

Untuk melihat struktur mikro bahan dilakukan pengamatan metalografi. Penyiapan sampel dilakukan menurut prosedur umum yang belaku. Pengetasan dilakukan dengan mencelupkan spesimen kedalam larutan etsa berupa larutan *Poulton reagent* + 25 ml  $\text{HNO}_3$  + 40 ml + 3 gram chromic acid per 10 ml  $\text{H}_2\text{O}$ . Lama pengetasan 1–4 menit, kemudian dicuci dengan air hangat dan dikeringkan. Pengamatan dilakukan dengan mikroskop optik.

### **III. Hasil dan Pembahasan**

#### **3.1 Hasil Pengujian Tarik**

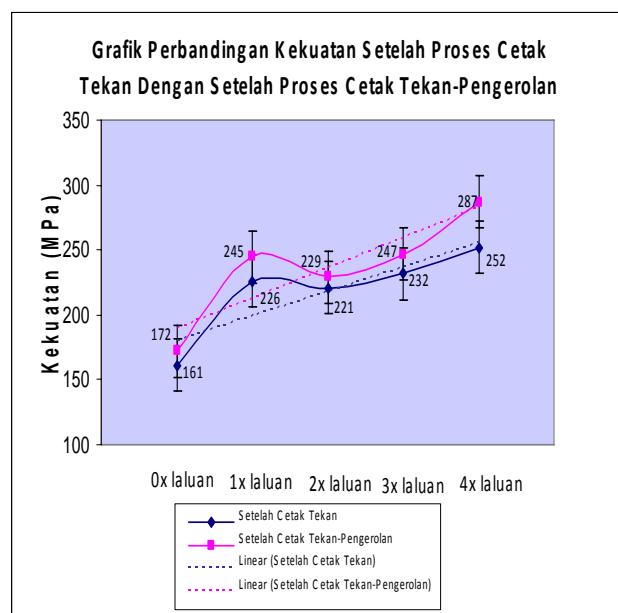
Hasil pengujian tarik untuk tiap laluan, yang dapat

menyatakan kekuatan Al pada tiap laluannya diperlihatkan pada Gambar 2.

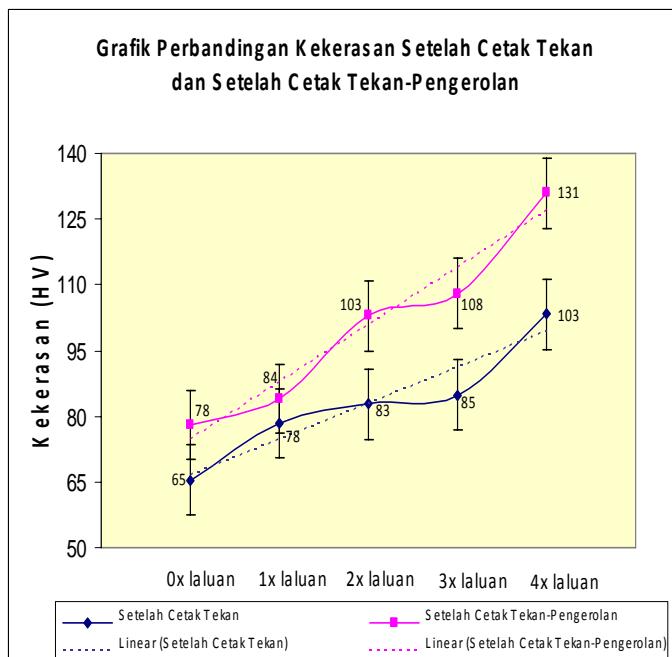
Disini dapat kita lihat nilai kekuatan tarik Al setelah proses Cetak-tekan lebih tinggi dibandingkan dengan kekuatan tarik proses penggerolan dingin. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh A.V Panin dkk [10], yang mendapatkan kekuatan tarik hasil Cetak-tekan pada titanium sebesar 650 MPa, di atas penggerolan dingin (530 MPa) dan annealing (315 MPa).

Kekuatan Aluminium komersil setelah proses Cetak-tekan cenderung meningkat setelah kombinasi proses Cetak-tekan-Pengerolan. Besarnya peningkatan kekuatan setelah proses kombinasi ini dibandingkan dengan Al kondisi 0x laluan (161 MPa) adalah 52% (245 MPa) untuk laluan pertama, 42% (229 MPa) untuk laluan kedua, 54% (247 MPa) untuk laluan ketiga dan 78% (287 MPa) untuk laluan keempat. Terjadinya peningkatan kekuatan setelah proses kombinasi ini disebabkan oleh peningkatan jumlah dislokasi dan pengerasan regangan akibat proses penggerolan dingin yang diberikan.





Gambar 2. Grafik perbandingan kekuatan aluminium komersil hasil proses Cetak-tekan dan hasil Cetak-tekan +Pengerolan



Gambar 3. Grafik perbandingan pengaruh jumlah tahap proses terhadap kekerasan aluminium setelah proses Cetak-tekan dan setelah proses Cetak-tekan-Pengerolan



### 3.2 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 Gambar 3.

Pada Gambar 3 dapat dilihat kekerasan aluminium mengalami peningkatan setelah proses Cetak-tekan saja seiring dengan peningkatan jumlah laluan. Besarnya peningkatan yang terjadi adalah sebesar 20% untuk laluan pertama, 27% untuk laluan kedua, 30% untuk laluan ketiga dan 58% untuk laluan keempat. Sedangkan, kekerasan untuk proses kombinasi Cetak-tekan-Pengerolan pada kondisi 0x laluan adalah 28% untuk laluan pertama, 58% untuk laluan kedua, 66% untuk laluan ketiga dan mencapai 100% pada laluan keempat. Disini dapat dilihat kekerasan aluminium hasil proses Cetak-tekan cenderung meningkat setelah proses kombinasi Cetak-tekan dan Pengerolan.

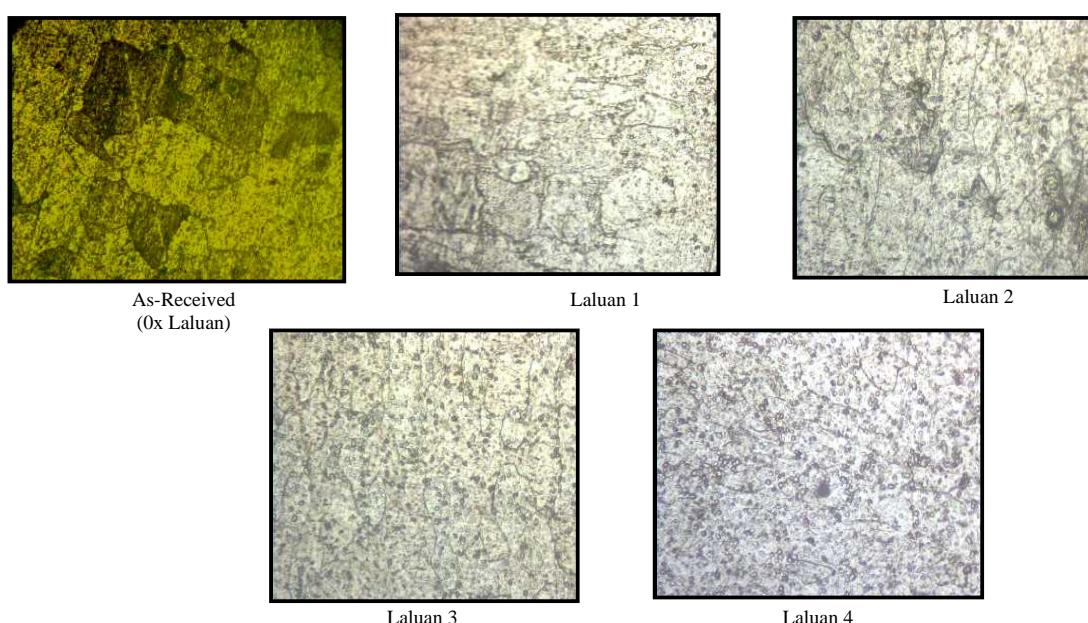
Pada Gambar diatas juga jelas terlihat bahwa harga kekerasan cukup signifikan didapatkan pada laluan pertama, dan pada laluan berikutnya terjadi penurunan margin peningkatannya terhadap laluan sebelumnya. Hal

ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Andre Ishlah Azani [9], dimana peningkatan yang signifikan didapatkan setelah laluan pertama.

Peningkatan kekerasan yang cukup baik ini juga disebabkan oleh penghalusan butir yang terjadi pada tiap langkah proses Cetak-tekan, dimana butir akan semakin kecil dan jumlah butir meningkat, sehingga secara langsung mengakibatkan butir-butirnya jadi lebih halus dibandingkan dengan butir pada material kondisi 0x laluan (*as-received*).

### 3.3 Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dari logam merupakan sarana yang penting untuk melihat keuntungan proses cetak-tekan dalam penghalusan butir (*ultra fine grain*) yang juga nantinya akan berpengaruh terhadap sifat mekanik dari material itu sendiri. Di bawah ini akan ditampilkan beberapa gambar struktur mikro aluminium bidang tegak lurus arah pembebahan (bidang melintang) dari aluminium pada kondisi setelah proses Cetak-tekan.



**Gambar 4** Struktur mikro hasil proses cetak-tekan untuk tiap laluan

Disini dapat dilihat struktur mikro aluminium komersil sebelum cetak-tekan (kondisi *as-received*). Dengan metoda *point counting* didapatkan diameter rata-rata butir sebesar  $125 \mu\text{m}$ , sedangkan struktur butirnya masih berbentuk *equiaxed*. Struktur mikro setelah cetak-tekan laluan pertama terjadi penghalusan butir apabila dibandingkan dengan material kondisi sebelum cetak-tekan. Terlihat dengan peningkatan jumlah batas butir

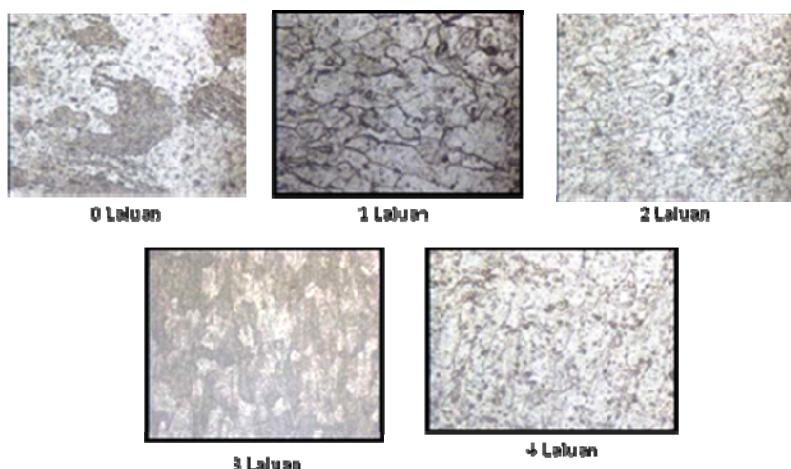
dan diameter rata-rata butir yang didapatkan adalah  $75 \mu\text{m}$ . Pada laluan kedua terjadi pengurangan ukuran butir, dimana struktur butir menjadi lebih halus dibandingkan dengan laluan pertama. Ini dibuktikan dengan ukuran diameter rata-rata yang didapat adalah sebesar  $66 \mu\text{m}$ . Untuk aluminium setelah Cetak-tekan dengan tiga kali laluan, terlihat terjadi penghalusan butir yang cukup jelas, disini didapatkan ukuran butir rata-rata sebesar  $58 \mu\text{m}$ .



$\mu\text{m}$ . Bentuk butir pada laluan ketiga ini pada umumnya masih sama dengan kondisi butir setelah laluan kedua, hanya saja disini terjadi pemecahan butir yang lebih banyak. Sementara itu pada laluan keempat terjadi penghalusan butir. Walaupun batas butir yang diperlihatkan oleh gambar kurang jelas namun secara keseluruhan terjadi pemecahan butir yang lebih banyak

dari pada laluan sebelumnya, dimana didapatkan ukuran butir rata-rata sebesar  $53 \mu\text{m}$ .

Selanjutnya di bawah ini diperlihatkan gambar struktur mikro aluminium bidang tegak lurus arah pembebahan (bidang melintang) pada kondisi setelah proses Cetak-tekan-Pengerolan.



**Gambar 5 Struktur mikro hasil proses cetak-tekan-pengerolan untuk hasil laluan**

Gambar 5 memperlihatkan perubahan struktur mikro aluminium setelah proses pengrolan dingin tanpa dilakukan proses Cetak-tekan. Butir yang terlihat sedikit lebih halus dibandingkan dengan butir aluminium pada kondisi 0x laluan (sebelum cetak-tekan). Bentuk butir masih sama dengan kondisi 0x laluan (sebelum Cetak-tekan) yaitu dengan bentuk *equiaxed*. Ukuran butir rata-rata yang didapatkan adalah sebesar  $101 \mu\text{m}$ . Sangat jelas terlihat terlihat perubahan orientasi butir, terjadinya penghalusan butir pada kondisi satu kali laluan setelah proses kombinasi Cetak Takan-Pengerolan. Ini sama halnya dengan aluminium setelah proses Cetak-tekan saja, tetapi disini terjadi peningkatan ukuran butir menjadi  $65 \mu\text{m}$ . Struktur butir laluan ketiga terlihat lebih halus dibandingkan dengan laluan kedua setelah proses Cetak-tekan saja. Ini dibuktikan dengan meningkatnya ukuran rata-rata butirnya menjadi  $62 \mu\text{m}$ . Disini terlihat efek dari pengrolan dingin, dimana terjadi pemecahan butir. Terlihat perubahan orientasi butir secara keseluruhan ukuran butir pada laluan ketiga setelah proses kombinasi Cetak-tekan-Pengerolan sedikit lebih halus dari pada proses Cetak-tekan saja. Dimana ukuran rata-rata butir adalah  $56 \mu\text{m}$ . Struktur mikro yang didapatkan pada laluan keempat terlihat lebih halus bila dibandingkan dengan aluminium laluan keempat setelah proses Cetak-tekan saja. Ukuran rata-rata butir yang

didapatkan adalah sebesar  $49 \mu\text{m}$ . Ini berhubungan dengan efek pengerasan regangan akibat pengrolan dingin yang bisa meningkatkan kekuatan dan kekerasan material.

Pengujian dilakukan dengan mikroskop optik dan menunjukkan keefektifan proses Cetak-tekan dalam hal penghalusan butir (*ultra fine grains*). Namun dalam hal ini, foto struktur mikro yang diambil dari arah melintang sehingga butir terlihat semakin halus seiring dengan kenaikan jumlah laluan proses Cetak-tekan. Ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh M. Furukawa [1].

#### 3.4 Hubungan antara Struktur mikro dengan Sifat Mekanik

Dari sifat mekanik yang didapatkan pada pengujian ini memiliki hubungan yang erat antara satu dengan yang lain. Pengujian tarik dan pengujian kekerasan berhubungan erat dengan perubahan yang terjadi pada struktur mikro aluminium yang diteliti.

Banyak faktor yang mempengaruhi perubahan sifat mekanik selama proses Cetak-tekan diantaranya variabel proses, langkah proses, geometri cetakan dan juga sifat dasar dari material itu sendiri. Aluminium komersil yang diproses dengan Cetak-tekan sangat menguntungkan dalam peningkatan sifat mekanik, terutama peningkatan



kekuatan dan kekerasan dengan peningkatan sudut misorientasi butir serta peningkatan mampu bentuk material. Proses Cetak-tekan ini dapat meningkatkan kerapatan dislokasi secara signifikan serta perubahan struktur mikro yang sangat cepat pada saat awal siklus penekanan dengan memberikan regangan yang tinggi akibat deformasi geser, dan juga energi regangan yang dihasilkan oleh proses Cetak-tekan jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan proses deformasi konvensional. Untuk lebih meningkatkan lagi kekuatan dan kekerasan dari aluminium ini maka dilakukan proses Penggerolan dingin setelah proses Cetak-tekan untuk mendapatkan plat aluminium berkekuatan tinggi.

Sewaktu material mengalami penggerolan dingin terjadi perubahan yang mencolok pada struktur butir seperti perpecahan butir dan pergeseran atom-atom. Karena tidak mungkin terjadi rekristalisasi selama penggerolan dingin, tidak terjadi pemulihan dari butir yang mengalami perpecahan. Dengan meningkatnya deformasi butir, tahanan terhadap deformasi meningkat sehingga logam mengalami peningkatan kekuatan dan kekerasan, peningkatan ini juga disebabkan oleh peningkatan jumlah dislokasi dan pengerasan regangan yang terjadi pada struktur material sebagai efek dari penggeraan 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.

#### IV. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Peningkatan kekuatan setelah proses cetak-tekan dari kondisi awal adalah 40, 37, 44, 57% masing-masing untuk laluan ke-1, 2, 3 dan 4. Sedangkan peningkatan kekuatan setelah proses kombinasi Cetak Tekan dan Penggerolan dari kondisi awal adalah 52, 42, 54, 78% untuk masing-masing laluan ke-1, 2, 3 dan 4.
2. Peningkatan kekerasan setelah proses cetak-tekan adalah 20, 27, 30, 58% pada laluan ke-1, 2, 3 dan 4. Sedangkan peningkatan kekerasan setelah proses kombinasi Cetak Tekan-Penggerolan dari kondisi awal adalah 28, 58, 66, 100% pada laluan ke-1, 2, 3 dan 4.
3. Perubahan struktur mikro setelah proses Cetak-tekan cukup signifikan dibandingkan dengan kondisi awal, dimana penghalusan butir terjadi seiring dengan meningkatnya jumlah laluan. Pada proses penggerolan tidak terjadi penghalusan butir yang signifikan.
4. Pengaruan pada proses cetak-tekan didominasi oleh penghalusan butir, sementara ketika proses penggerolan dingin efek pengerasan regangan yang paling dominan

#### Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada DP2M Dikti yang telah membiayai penelitian ini melalui hibah strategis nasional tahun 2009/2010.

#### 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, *Process Modeling of Equal Channel Angular Pressing*, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Edited by Zehedbauwer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim, 2004
- [3] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Acta Mater. 46 (1998) 3317.
- [4] V.M. Segal, Mater. Sci. Eng. A 271 (1999) 322.
- [5] E.O.Hall, Proc.Roy.Soc. B 64 (1951) 747
- [6] N.J.Petch, J.Iron Steel Inst.174 (1953) 25
- [7] Pluth, M, *Mechanical Properties of Consolidated Metal Nanopowder*, Nanopowder Rewrite, 2002
- [8] Utama, J.S, *Pengaruh Rute Equal Channel Angular Pressing (ECAP) Terhadap Kekuatan, Kekerasan dan Struktur mikro Aluminium Komersil*, 2005, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas
- [9] Azani, A.I, *Analisis Stabilitas Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Terhadap Perubahan Temperatur Pada Aluminium Komersil yang Diproses Dengan ECAP Rute Bc*, 2007, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas
- [10] Panin, A.V., dkk, Phys.Mesomech.2002, 5, hal 73-48.



