

KARAKTERISTIK BAJA ST 41 HASIL PROSES *HOT EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (HECAP)*

Slamet Wiyono^{1*}, Anistasia Milandia², Muhammad Zaky Mubarak¹

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

² Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Jend. Sudirman Km 3 Cilegon, 42435

*E-mail: maswie@untirta.ac.id

ABSTRAK

Proses ECAP merupakan salah satu proses perlakuan mekanik yang mampu menghasilkan butir material yang sangat halus (ultrafine grained). Baja karbon rendah dengan kandungan 0.16% C berdiameter 11mm dan panjang 65mm diberikan perlakuan mekanik melalui proses ECAP menggunakan cetakan yang memiliki sudut pada sisi dalam, $\theta = 120^{\circ}$ dan sudut sisi luar, $\Psi = 7^{\circ}$. Variabel prosesnya adalah jumlah laluan deformasi tanpa mengubah rute setiap laluan. Dampak dari proses terhadap sampel ditinjau melalui uji kekerasan, densitas, porositas, dan metalografi. Sedangkan untuk mengetahui kekuatan sampel dilakukan dengan pendekatan persamaan Hall-Petch dimana besar butir yang terbentuk diukur menggunakan software Image-J. Hasil pengujian pada sampel menunjukkan adanya peningkatan densitas, penurunan porositas, dan penghalusan butir pada sisi sampel seiring peningkatan jumlah tahapan (laluan) deformasi yang menunjukkan peningkatan kekuatan dari baja karbon rendah ST 41.

Kata kunci: ECAP, ultrafine grained, baja karbon rendah, ST 41, Hall-Petch, Image-J

PENDAHULUAN

Salah satu teknik yang paling populer diantara metode *severe plastic deformation (SPD)* yang digunakan untuk memproduksi polikristalin material dengan diameter butiran di kisaran submikrometer adalah *equal channel angular pressing (ECAP)*, atau *equal channel angular extrusion (ECAE)*. Proses ini awalnya dikembangkan oleh VM Segal dan rekan-rekannya di Uni Soviet pada tahun 1970-an. Mmenyusul runtuhnya Uni Soviet, Segal pindah ke Texas bekerja di Texas A & M University, di mana ia memperbaiki dan mematenkan teknik ini.

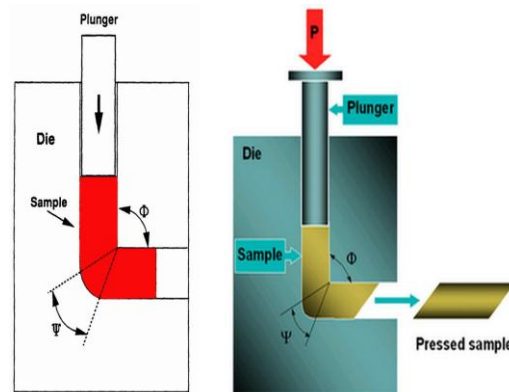
Pemilihan proses ECAP didasarkan pada beberapa alasan, antara lain proses ECAP adalah proses paling efektif diantara proses SPD lainnya, tidak terjadi perubahan penampang melintang, peningkatan kekuatan material dapat dilakukan pada temperatur rendah dan proses ECAP mudah terintegrasi dalam industri serta mampu menghasilkan produk dalam skala bulk atau batangan Valiev dan Langdon, 2006.

TINJAUAN PUSTAKA

Equal-channel angular pressing (ECAP) adalah salah satu jenis dari deformasi plastis tingkat tinggi (*severe plastic deformation*). Metode ini telah menjadi sangat sukses dalam memproduksi butir mikro untuk logam masal dan paduan (Marzuki, R, 2011). ECAP atau proses cetak tekan dapat menghasilkan kekuatan yang sangat tinggi. Cetak tekan adalah suatu prosedur proses dimana material diberikan regangan plastis berupa geseran sederhana dengan penekanan melalui cetakan dua saluran yang berbentuk L dengan penampang sama dan memiliki sudut (θ) antara dua saluran tersebut, seperti terlihat pada Gambar 1.

Pada dasarnya sebuah mekanisme cetak tekan terdiri dari material uji, *plunger* yang berfungsi untuk menekan spesimen melalui alur cetakan, pelumas dan cetakan dengan dua buah alur yang berpenampang sama. Kedua alur cetakan tersebut bertemu disudut $\Phi = 90^\circ$ dan $\psi = 20^\circ$, selama proses ini material ditekan melalui kedua alur tersebut, Marzuki, R, 2011.

Sebuah karakteristik yang penting dari cetak tekan adalah tidak adanya perubahan dimensi penampang spesimen sewaktu melewati alur cetakan. Bagaimanapun penggunaan cetak tekan memberikan potensi untuk perubahan dalam yang terkendali dan keuntungan tertentu dari sifat-sifat material yang dipilih. Saat ini prosedur peregangannya ini telah digunakan pada material-material logam murni, logam paduan dan intermetalik.

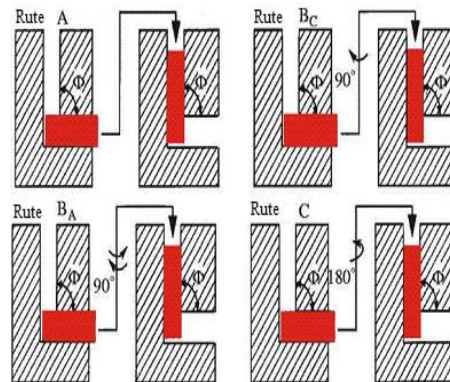


Gambar 1. Prinsip ECAP (Vaclav S, 2013)

Beberapa faktor yang mempengaruhi struktur mikro hasil proses cetak tekan adalah rute proses, dimana sampel diputar diantara penekanan yang berturut-turut, geometri cetakan, seperti θ sudut diantara kedua alur cetakan (*channel angle*, ψ) dan sudut lengkungan cetakan (*corner angle*, Φ), variabel proses seperti, kecepatan penekanan, pelumasan dan temperatur serta sifat material, seperti kekuatan dan perilaku pengerasan.

Dengan mengubah orientasi spesimen antara penekanan berturut-turut, struktur mikro yang kompleks dan tekstur material dapat dikembangkan. Untuk mencapai penghalusan butir dalam skala nano (*nanoscales*), pengembangan rute yang optimal untuk pengendalian struktur mikro dapat dilakukan dengan mengubah orientasi setelah dilewatkan pada masing-masing penekanan. Penekanan berulang memberikan peluang untuk mengaktifkan sistem slip yang berbeda hanya dengan memutar sampel dengan cara yang berbeda. Keempat rute proses yang berbeda secara skematis digambarkan pada Gambar 2.

Perbedaan antara rute dan perbedaan jumlah penekanan ECAP dapat menyebabkan variasi baik dalam distorsi makroskopik butir individu dan kemampuan untuk mengembangkan *ultrafine grained* cukup yang homogen.



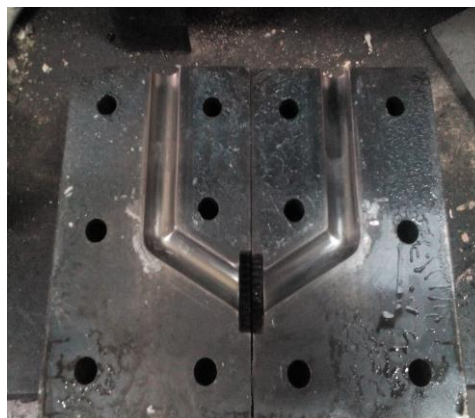
Gambar 2. Skema empat rute ECAP untuk penekanan berulang-ulang (Vaclav S, 2013)

Rute A, yaitu rute dengan putaran sampel sebesar 0^0 untuk tiap langkah proses. Rute BA, yaitu rute dengan putaran sampel sebesar 90^0 dengan arah berlawanan untuk tiap langkah proses. Rute BC, yaitu rute dengan putaran sampel sebesar 90^0 dengan arah yang sama untuk tiap langkah proses. Rute C, yaitu rute dengan putaran sampel sebesar 180^0 untuk tiap langkah proses

METODE PENELITIAN

Proses ECAP dilakukan pada kondisi panas. Dua buah sampel Baja ST 41 dipanaskan pada suhu 650°C selama kurang lebih 1 jam. Tujuan pemanasan ini adalah untuk melunakan baja tersebut sehingga lebih mudah untuk dilakukan penekanan pada cetakan ECAP. Selanjutnya kedua sampel dilewatkan pada cetakan secara bergantian. Sampel pertama dilewatkan pada cetakan dalam satu tahapan ECAP, sedangkan sample lainnya dilewatkan pada cetakan dalam dua tahapan ECAP.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin press berkapasitas 100 ton, cetakan ECAP dengan sudut θ 120° dan sudut Ψ 7° (dapat dilihat pada gambar 3). Mesin uji kekerasan *Rockwell*, mesin *grinding*, *polishing*, dan mesin *mounting*. Mesin uji metalografi, *muffle furnace*, gelas ukur dan timbangan digital dengan kapasitas 500 gr.



Gambar 3. Cetakan ECAP

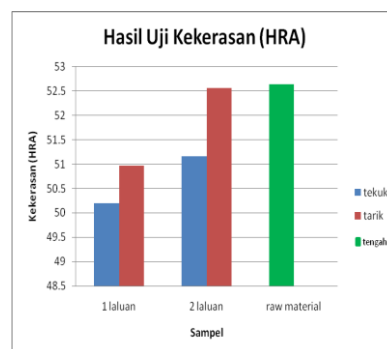
Sedangkan material uji yang digunakan adalah baja karbon ST 41 dengan kadar karbon 0,16%. Dimensi sample \varnothing 11 x 67 mm.



Gambar 4. Sampel baja ST 41

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan yang dilakukan dengan metode *Rockwell A* (HRA) dengan beban 60 kgF menggunakan indenter *diamond cone* terhadap baja ST 41 hasil proses ECAP, diperoleh data kekerasan seperti pada Gambar 5. Terdapat perbedaan nilai kekerasan yang signifikan antara proses ECAP satu tahapan laluan dengan proses ECAP dua tahapan laluan. Proses ECAP dengan dua tahapan laluan mampu memberikan dampak kekerasan yang lebih besar dibandingkan proses ECAP dengan satu tahapan laluan. Namun demikian karena proses ECAP dilakukan pada kondisi panas, artinya bahwa sampel dilunakkan terlebih dahulu untuk memudahkan proses penekanan pada cetakan ECAP. Peningkatan kekerasan sample cenderung tidak berarti dibandingkan dengan kekerasan sample awal (raw material) khususnya untuk sample yang diberikan perlakuan proses ECAP satu tahapan (laluan). Berbeda dengan kekerasan sample hasil proses ECAP dua tahapan (laluan) yang mampu mendekati nilai kekerasan raw material, khususnya pada sisi tarik. Secara logika sederhana dapat dihipotesiskan bahwa jika sample diberikan perlakuan pada kondisi dingin maka akan diperoleh peningkatan nilai kekerasan yang signifikan jika dibandingkan nilai kekerasan raw material.



Gambar 5. Grafik hasil uji kekerasan

Sedangkan Jika ditinjau dari analisa metalografi, sample yang telah diberi perlakuan ECAP mengalami penghalusan butir, yang seharusnya nilai kekerasannya semakin meningkat. Terjadinya perbedaan antara hasil uji kekerasan dan analisa metalografi dimungkinkan adanya kesalahan dalam preparasi sample ataupun prosedur pengujian kekerasan dimana indenter tidak mengenai bagian yang mengalami penghalusan butir ini. Oleh karena itu, dilakukan pengukuran besar butir untuk membuktikan analisa dengan menggunakan bantuan *free-software* Image J. Dari hasil analisis partikel, maka didapatkan luas area rata-rata partikel. Dengan mengasumsikan partikel berbentuk bola maka dari luas area rata-rata (A) yang dihasilkan dapat dihitung diameter partikelnya (d) dengan menggunakan persamaan:

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

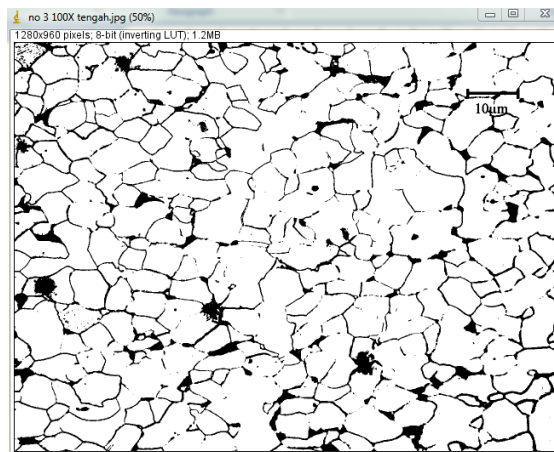
Setelah dilakukan analisa partikel, didapat hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil perhitungan diameter butir pada sisi sampel (*twinning*)

Sampel	sisi	Rata-rata Luas Area (A)	Diameter (d)	Hall-Petch (Pa)
1	Tarik	0.104	0.364	71.226
Laluan	Tekuk	0.121	0.393	71.181
2	Tarik	0.05	0.252	71.473
Laluan	Tekuk	0.041	0.228	71.548

Tabel 2. Hasil perhitungan diameter butir pada tengah sampel (*non twinning*)

Sampel	sisi	Rata-rata luas Area (A)	Diameter (d)	Hall-Petch (Pa)
1 Laluan	Tengah	0.841	1.035	70.727
2 Laluan	Tengah	0.795	1.006	70.738
Raw material	Tengah	0.646	0.907	70.776



Gambar 6. Foto hasil analisa software image J

Dari hasil perhitungan pada tabel 1 yaitu sisi sampel yang mengalami proses *twinning*, dapat dilihat bahwa sampel 1 dan 2 memiliki diameter butir yang lebih kecil, dibandingkan dengan diameter butir yang tidak mengalami proses *twinning*, seperti terlihat pada tabel 2. Terutama pada sampel 2 yang memiliki diameter butir paling kecil, yang berarti bahwa sampel 2 ini memiliki butiran yang sangat halus, dan memiliki nilai kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi.

Hal serupa akan sama apabila hasil analisa dimasukkan ke persamaan Hall-Petch:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K_y}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

Dimana:

Flywheel

Jurnal Teknik Mesin Untirta

σ_y = tegangan luluh (Pa)

σ_0 = nilai konstan material untuk tegangan dislokasi (70 MPa)

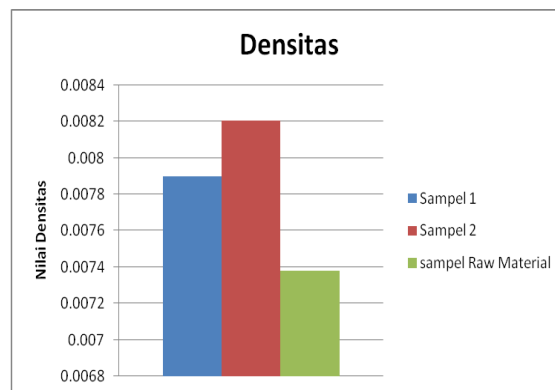
K_y = nilai konstanta koefisien penguatan ($0.74 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

d = diameter rata-rata (μm)

Persamaan Hall-Petch memperlihatkan bahwa semakin kecil diameter butir, akan semakin besar nilai tegangannya, yang berarti bahwa semakin besar tegangan berbanding lurus dengan nilai kekerasan. Semakin besar nilainya, akan semakin kuat material tersebut.

Densitas

Hasil uji densitas pada setiap sampel diperlihatkan pada Gambar 4.3 berikut ini.

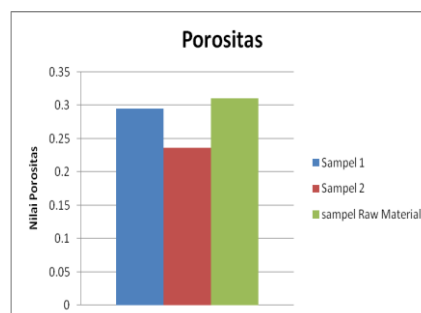


Gambar 7. Grafik nilai densitas

Sampel yang memiliki nilai densitas paling rendah adalah raw material, karena sampel raw material tidak mengalami penekanan sehingga tidak terjadi kerapatan antar butir-butirnya. Sedangkan sampel yang mengalami proses ECAP 1 dan 2 laluan mengalami peningkatan nilai densitas seiring jumlah laluan yang dilakukan, hal ini terjadi karena semakin banyak jumlah laluan, sampel akan mengalami banyak penekanan dan terjadi pepadatan sehingga butir-butir mengalami penghalusan dan pepadatan butir.

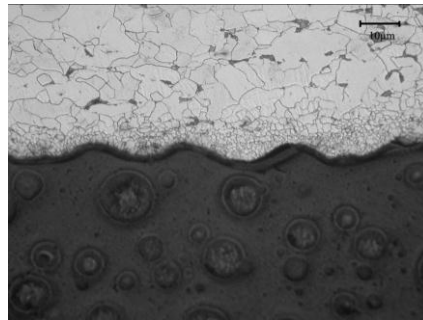
Porositas

Data uji porositas diperlihatkan pada Gambar 8. Porositas pada sampel hasil proses ECAP 1 dan 2 laluan mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena rongga-rongga porositas berkurang akibat penekanan dan pepadatan butir, sehingga mengurangi pori pada sampel. Nilai porositas berkurang seiring banyaknya jumlah laluan yang dilakukan pada sampel.

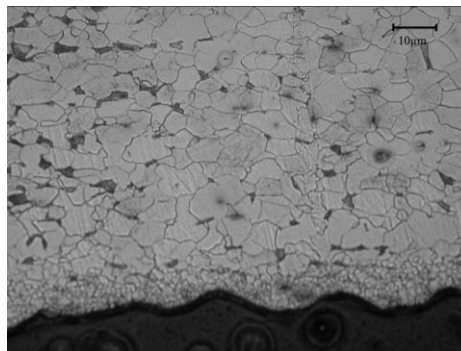


Gambar 8. Data uji porositas**Struktur Mikro**

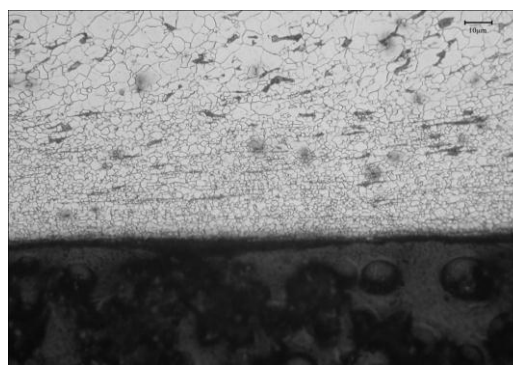
Setelah dilakukan pengamatan butiran struktur mikro pada setiap sisi sampel. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



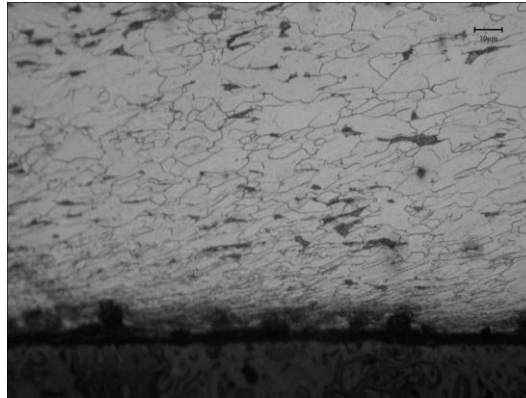
Gambar 9. Struktur mikro sampel 1 lalan, sisi tekuk, pembesaran 100x



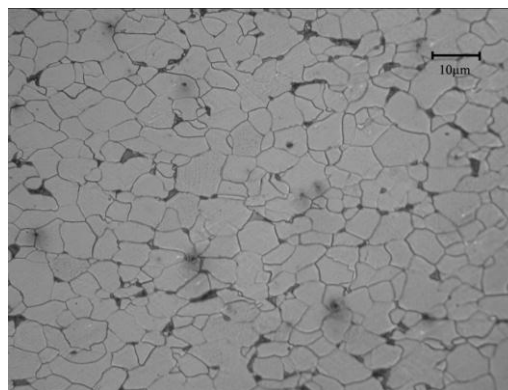
Gambar 10. Struktur mikro sampel 1 lalan, sisi tarik, pembesaran 100x



Gambar 11. Struktur mikro sampel 2 lalan, sisi tekuk, pembesaran 100x



Gambar 12. Struktur mikro sampel 2 laluan, sisi tarik, pembesaran 100x



Gambar 13. Struktur mikro raw material, pembesaran 100x

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Setelah semua proses pengujian dan analisa data pengujian proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) pada baja karbon rendah ST 41, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Jumlah tahapan (laluan) deformasi sangat berpengaruh terhadap produk hasil proses ECAP. Penghalusan butir, meningkatkan nilai kekerasan, nilai densitas, dan menurunkan porositas sampel.
2. Peningkatan nilai kekerasan pada sampel terfokus pada sisi sampel, karena pada sisi ini sampel mengalami deformasi secara menyeluruh. Sedangkan pada bagian tengah tidak terlalu berpengaruh. Nilai kekerasan sampel 1 laluan yaitu 50.20 HRA pada sisi tekuk, dan 50.97 HRA pada sisi tarik. Nilai kekerasan sampel 2 yaitu 51.17 HRA pada sisi tekuk, dan 52.57 HRA pada sisi tarik.

Saran

Untuk menghasilkan data yang lebih komprehensif dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan mempertimbangkan parameter lainnya dengan variabilitas yang lebih banyak.

Daftar Pustaka

- Hadi Qomarul, *Pengaruh Jumlah Laluan Arah Bolak-Balik Pada Alumunium Komersil Dengan Proses Ecap Terhadap Sifat Mekanik*, Teknik mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, 2011
- Candra, Thomas, Perdamean, *Analisis Ukuran Partikel Menggunakan Free Software Image-J*, Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, 2011.

- Qu S, Huang C.X, 2008, Tensile And Compressive Properties Of AISI 304l Stainless Steel Subjected To Equal Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering A* 475, Hal 207–216
- Prabhudev K.H, 1988, *Handbook Of Heat Treatment Of Steel*, Hal 4
- Dobatkin S, *Strength and Ductility of Medium Carbon Steel After Equal Channel Angular Pressing*, A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow, Rusia, 2010
- Bergwerf Reinier, *Equal Channel Angular Pressing of High Carbon Steel*, Delf University of Technology, Netherlands, 2007
- Horita Z, Langdon T.G, 2002, *Processing of a Low-Carbon Steel by Equal Channel Angular Pressing*, *Acta Materialia*, Vol 50, Hal 1359–1368
- Asep B.U, *Sintesa Komposit Berbasis Aluminium Berpenguat Al₂O₃ Hasil Proses Deformasi Plastik Tingkat Tinggi (Equal Channel Angular Pressing)*, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 2014
- Prifiharni Siska, *Perubahan Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Aluminium 5052 Hasil Annealing Dengan Proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP)*, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 2013.
- G.Guy Albert, J. Hren John. *Element of Physical Metallurgy*, third edition. Hal 333. Addison-Wesley Publishing Company, California.
- <http://www.steelindopersada.com/2014/06/pembagian-dan-sifat-sifat-baja.html> diakses pada 4/3/2016