

PENGARUH PERLAKUAN ANNEALING TERHADAP STRUKTURMIKRO DAN SIFAT MEKANIK TEMBAGA KOMERSIL YANG DIPROSES DENGAN ECAP RUTE Bc

1). Jon Affi 2). Gunawarman

^{1,2} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Kecamatan Pauh
Padang 25163

E-mail : jon_affi@ft.unand.ac.id, jonaffi@yahoo.co.uk

Abstrak

Dengan makin terbatasnya ketersediaan material logam serta makin berkembangnya teknologi yang membutuhkan material dengan sifat mekanik yang lebih baik telah mendorong ilmuwan untuk memperbaharui material sehingga diperoleh sifat yang unggul. Mekanisme penguatan material dengan cara penghalusan butir telah mendapat perhatian lebih baik baru-baru ini. Deformasi plastis yang menyeluruh (Severe Plastic Deformation – SPD) adalah metoda efektif untuk membentuk material dengan ukuran butir sub-mikro (Submicron-grained–SMG). ECAP adalah satu diantara teknik SPD yang telah dipilih karena dapat menghasilkan peningkatan sifat mekanik yang signifikan.

Proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) adalah proses dimana sebuah sampel diberikan regangan plastis berupa geseran sederhana dengan penekanan melalui cetakan khusus. Cetakan ini terdiri dari dua buah alur berpenampang sama yang dipisahkan oleh sudut alur $\Phi=90^\circ$ dan sudut lengkung cetakan $\psi=20^\circ$. Regangan yang besar akibat penekanan yang berulang-ulang pada proses ECAP ini mengakibatkan perubahan pada struktur butir hingga mampu menghasilkan ukuran butir dalam range submikrometer atau nanometer.

Penghalusan struktur mikro tembaga komersil (as received) yang di-anneal dengan memvariasikan jumlah laluan pada metoda Equal Channel Angular Pressing (ECAP) terdapat peningkatan kekerasann sebesar 38%, 57% dan 89% terhadap as received , peningkatan kekuatan tarik sebesar 44.7%, 49.7 dan 61% serta perubahan ukuran butir sebesar 31%, 28% dan 21% untuk 1x, 2x dan 3x laluan terhadap as annealed.

Kata kunci: SPD, ECAP, SMG

1. Pendahuluan

Material yang mempunyai struktur yang super kuat, mampu bentuk yang tinggi, tahan korosi dan komposisi kimia yang sederhana telah dituntut untuk pemenuhan kebutuhan akan material dewasa ini. Baru-baru ini telah dikembangkan metode efektif untuk mendapatkan material dengan sifat yang unggul tersebut melalui deformasi plastis secara menyeluruh (SPD). Metoda ini telah terbukti mampu menghasilkan penghalusan butir yang sangat signifikan pada material polikristal [1]. Penghalusan butir ini dapat dicapai dalam skala submikrometer atau nanometer melalui beberapa cara seperti: multiple forging, torsion straining, accumulated roll bending dan ECAP [5]. Proses *Equal Channel Angular Pressing (ECAP)* merupakan teknik deformasi plastis menyeluruh yang terbaik diantara beberapa proses SPD tersebut [1,4,7,9].

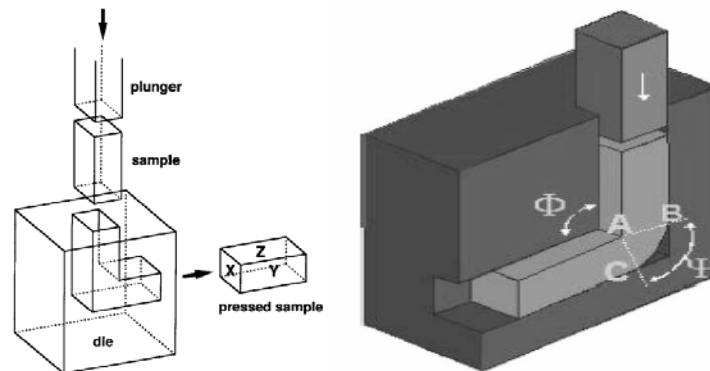
Penelitian ini telah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh annealing dan jumlah laluan proses ECAP dengan memutar spesimen sebesar 90° (rute B_c) terhadap struktur mikro dan sifat mekanik tembaga terutama kekuatan & kekerasan tembaga tersebut. Penelitian difokuskan pada pengaruh Annealing terhadap perubahan sifat mekanik material tembaga komersil yang dihubungkan dengan struktur mikronya setelah proses ECAP. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan proses ECAP terhadap material yang tidak dipelakukan Annealling.

Proses Deformasi Menyeluruh ECAP

Prosedur ECAP dikembangkan pertama kali oleh Segal dan kawan-kawan pada tahun 1981 [1,7]. Pemilihan proses ECAP didasarkan pada tiga alasan yaitu:

1. Proses ECAP adalah proses paling efektif diantara proses SPD untuk meningkatkan kekuatan material [5]
2. Peningkatan kekuatan material dapat dilakukan pada temperatur rendah [1,21,22,23]
3. Proses ECAP mudah terintegrasi dalam industri serta mampu menghasilkan produk dalam skala bulk/batangan [15,16].

Equal Channel Angular Pressing (ECAP) merupakan proses dimana sampel diberikan regangan plastis melalui penekanan dalam cetakan beralur khusus. Cetakan mempunyai dua alur laluan pada bagian dalam yang dengan luas penampang yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Material dipaksa masuk melalui cetakan dengan penekanan. Material cetakan harus dipilih dari material yang berbeda dari sampel, sangat kuat dan keras.



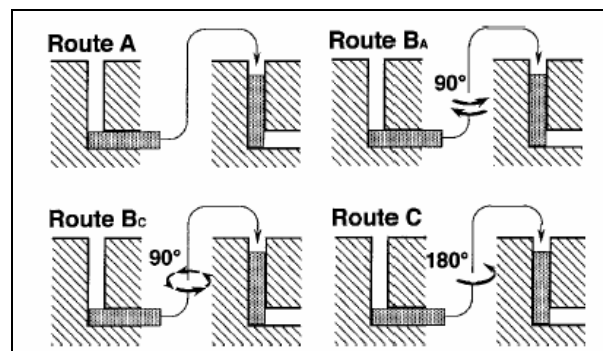
Gambar 1. Skema proses ECAP [1]

Manfaat lain dari ECAP adalah mampu meningkatkan sifat mampu bentuk pada temperatur tinggi seperti yang telah diteliti oleh Sungwon Lee dan kawan-kawan [7]. Peningkatan sifat ulet menjadi material superplastis pada aluminium dengan temperatur pengerjaan 673 K atau lebih telah di peroleh dari penelitian mereka. Sifat ini sangat berguna dalam industri logam terutama pada proses pembentukan (Forming).

Faktor yang mempengaruhi strukturmikro dan sifat mekanik material hasil proses ECAP adalah :

1. Rute proses, dimana sampel diputar diantara urutan penekanan [1].
2. Geometri cetakan seperti, Φ sudut diantara kedua alur cetakan (*channel angle*) dan ψ sudut lengkungan cetakan (*corner angle*)[7,8].
3. Variabel proses seperti, kecepatan penekanan, pelumasan, dan temperatur [7].
4. Sifat material, seperti kekuatan dan perilaku pengerasan [9].

Rute Proses ECAP



Gambar 2. Rute proses ECAP [1]

Rute proses ECAP dibagi atas tiga bagian seperti dijelaskan pada Gambar 2 yaitu:

- ◆ Rute A, yaitu tanpa pemutaran sampel pada langkah proses berikutnya.

- ◆ Rute B, yaitu pemutaran sampel sebesar 90° pada langkah proses berikutnya.
- ◆ Rute C, yaitu pemutaran sampel sebesar 180° pada langkah proses berikutnya.
Rute B dibagi lagi menjadi dua yaitu :
 - ❖ Rute B_A, yaitu pemutaran sampel dengan arah berlawanan arah jarum jam (*alternating direction*) terhadap langkah berikutnya.
 - ❖ Rute B_C, yaitu pemutaran sampel dengan arah searah jarum jam (*current direction*) terhadap langkah berikutnya

2. Bahan dan Metodologi Penelitian:

Cetakan untuk ECAP dibuat dari material *Tool Steel* dari jenis *D-11* yang dibuat di Laboratorium Teknologi Produksi pada Toyohashi Institute of Technology, Japan. Cetakan terdiri dari bagian dalam dan bagian luar yang disatukan dengan baut berkekuatan tinggi. Bagian dalam merupakan cetakan inti tempat alur cetakan. Material sampel yang digunakan adalah tembaga murni komersil berbentuk batang dengan penampang 10x10 mm dan panjang 100 mm. Semua sampel disiapkan untuk pengujian ECAP dengan berbagai jumlah laluan serta sampel as received disiapkan sebagai pembanding. Sebelum diproses ECAP material uji di-Anneal hingga 500°C . Sampel as-anneal juga dipakai sebagai pembanding sifat mekanik dan struktur mikro hasil ECAP.

Material eksperimen menggunakan rute Bc (dipilih karena menghasilkan struktur mikro homogen high angle lebih cepat). Keseragaman struktur mikro agak baik didapat dari specimen ECAP. butir berbentuk lebih halus terlihat pada sisi melintang (equaxed)[6].

Proses ECAP dilakukan pada *Universal Testing Machine* tipe RAT-30P dengan route Bc. Semua sampel terlebih dahulu di-anneal dan sampel bervariasi berturut-turut 1x laluan, 2x laluan dan 3x laluan. Selanjutnya semua sampel uji hasil ECAP dan as annealed diuji keras dengan Shimadzu Microhardness Tester Type-M dan diuji tarik dengan Com-Ten Testing Machine 95T Series. Sampel pada pemeriksaan struktur mikro disiapkan dengan pengamplasan hingga pemolesan dan dietsa dalam larutan K_2CrO_7 dan HNO_3 . Pemeriksaan mikrostruktur selanjutnya dilakukan dengan Nikon Metallurgical Microscope tipe Optihot-100S.

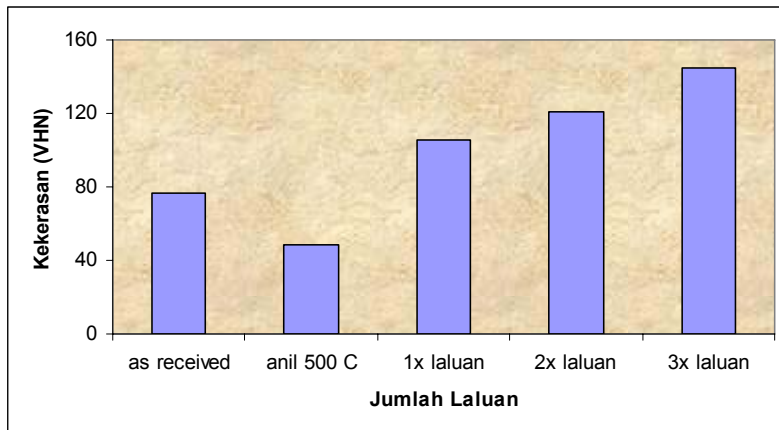
3. Hasil dan Diskusi

Pengujian kekerasan dan pengujian tarik

Variasi hasil pengukuran kekerasan mikrohardness sampel tembaga yang diproses dengan berbagai laluan dan material as received ditunjukkan pada Gambar 3. Pengukuran dilakukan tegak lurus arah penekanan (bidang X). Kekerasan menurun terhadap material as received bila dilakukan proses annealing. Ini mudah dipahami karena material as received telah mengalami proses perlakuan hot atau cold rolling sebelum dipasarkan. Setelah di-anneal akan mengalami pemulihan dan rekristalisasi. Setelah proses ECAP terlihat peningkatan yang cukup tajam yaitu lebih dua kali dibandingkan setelah laluan pertama terhadap as annealed. Sedangkan terhadap as received peningkatan kekerasan hampir dua kali lipat dicapai setelah laluan ketiga. Pada 1x laluan, 2x laluan dan 3x laluan kekerasan tetap lebih tinggi dibanding as received. Jika dibanding tanpa didahului proses anneal [6], peningkatan tajam terjadi setelah melalui 1x dan 2x laluan, sedangkan 3x laluan peningkatan kekerasan tidak begitu besar. Peningkatan kekerasan berturut-turut 17 %, 50 % dan 57 % untuk 1,2 dan 3x laluan pada sisi X. Setelah dianneal, peningkatan kekerasan berturut untuk 1x, 2x dan 3x laluan terhadap as received adalah: 38%, 57% dan 89 %. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan terhadap material as received setiap laluan lebih tinggi pada material yang dianneal dibanding tanpa di-anneal. Untuk satu kali laluan terbukti material tembaga yang di-anneal meningkat sekitar 38% kekerasannya dibanding tanpa anneal peningkatan terjadi hanya 17%, begitu juga dengan laluan 2 kali dan 3 kali. Peningkatan kekerasan lebih signifikan pada material tembaga yang di-anneal.

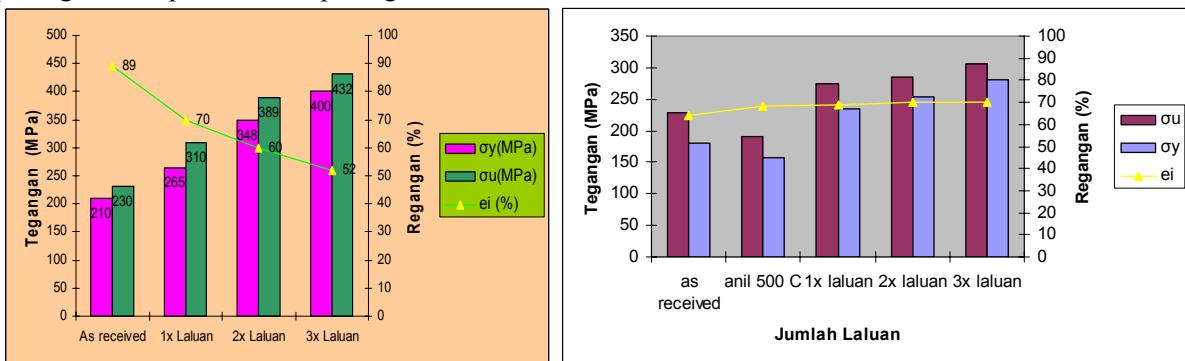
Hasil pengujian tarik dari beberapa proses ECAP tanpa anneal dan setelah anneal dengan variasi jumlah laluan dirangkum dalam Gambar 4. Gambar 4a menunjukkan bahwa tembaga komersil yang diproses dengan 3 laluan memiliki kekuatan tertinggi. Peningkatan kekuatan ini proporsional dengan

hasil pengujian kekerasan. Sebaliknya, peningkatan kekuatan diikuti dengan penurunan keuletan tetapi penurunan ini tidak setajam hasil proses pengerjaan dingin (strain hardening). Proses ECAP sampai



Gambar. 3. Kekerasan rata-rata pada bidang tegak lurus penekanan (bidang x)

laluan ke tiga masih mempunyai keuletan hingga 52 %. Penurunan keuletan sejalan hasil penelitian yang dikemukakan oleh Furukawa dan kawan-kawan. Penurunan keuletan pada Al-5% Fe yang di cor kemudian dilakukan proses ECAP adalah 6.8 ke 5.8% [1,5]. Peningkatan kekuatan tembaga komersial pada penelitian ini mencapai 87 % yaitu dari 229.95 MPa menjadi 430.09 MPa setelah 3x laluan penekanan, untuk 2x laluan peningkatan mencapai 69 %, sedang untuk 1x laluan kenaikan mencapai 35 % dengan menggunakan rute Bc. Hasil Penelitian agak kurang memuaskan dari hasil yang diperoleh Furukawa dan kawan-kawan. Proses ECAP meningkatkan kekuatan pada Al-5% Fe yang dicor mencapai 400 %, dari 58 ke 244 MPa, [1,5]. Peningkatan kekuatan yang tidak terlalu besar ini disebabkan karena laju regangan yang rendah selama proses ECAP. Proses ECAP dilakukan pada Universal Testing Machine dengan penggerak hidrolis. Kecepatan proses setiap laluan berkisar 10 hingga 15 menit. Sedangkan Furukawa melakukannya dengan mesin press dengan kecepatan dalam orde detik. Hal serupa juga terjadi pada proses ECAP yang didahului oleh proses Anneal. Peningkatan kekuatan tarik dan kekuatan luluh tetap terjadi dibanding kondisi as received. Hal yang menarik adalah: jika pada kondisi tidak di anneal terdapat penurunan keuletan sedangkan pada pada kondisi yang di anneal proses ECAP tetap menghasilkan keuletan yang cukup baik, bahkan cenderung ada peningkatan seperti terlihat pada gambar 4.b.



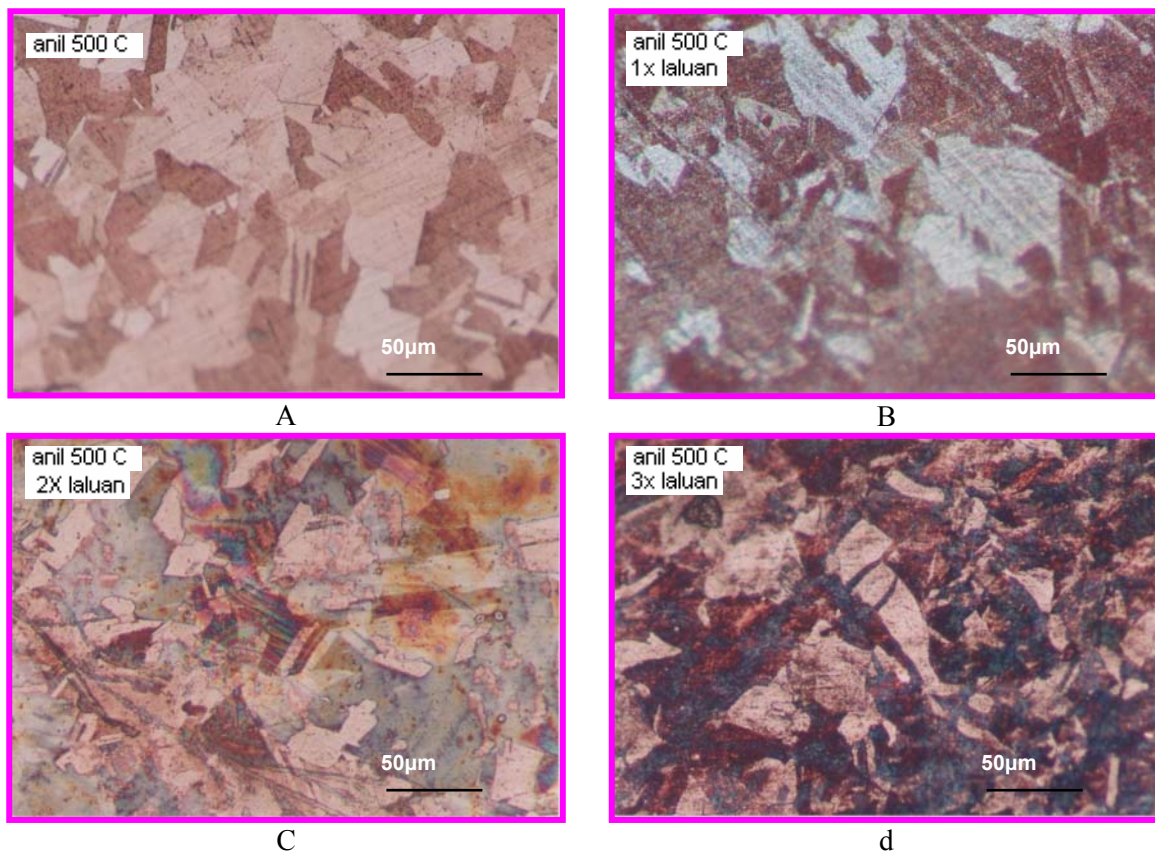
Gambar. 4a. Sifat tarik dan keuletan material tembaga yang diproses dengan ECAP dibandingkan dengan kondisi as received [6]. b Kurva perbandingan tegangan yield, tegangan ultimate, regangan pada 1x, 2x, 3x laluan proses ECAP setelah di-anneal.

Pemeriksaan Struktur mikro

Pemeriksaan strukturmikro telah dilakukan dengan perbesaran 200x menggunakan mikroskop optik logam. Struktur mikro pada penampang melintang tanpa anneal terlebih dahulu cenderung equiaxed pada semua laluan [6]. Penghalusan butir terjadi secara bertingkat dari laluan pertama hingga laluan ketiga seperti terlihat pada Gambar 5. Rute Bc dipilih karena menurut Iwahashi et al [7] yang menguji

Aluminium murni dengan rute A, Bc dan C. Dari hasil penelitian mereka dapat disimpulkan bahwa keefektifan penghalusan butir menurut rute adalah rute Bc > rute C > rute A. Disamping itu strukturmikro yang dihasilkan lebih homogen dengan sudut butir yang lebih besar (high angle boundary)

Peningkatan kekuatan luluh (YS) dan kekuatan tarik (UTS) secara signifikan jelas berhubungan dengan ukuran butir. Ukuran butir rata-rata pada material as received adalah $\sim 101.25\mu\text{m}$. Setelah melalui proses ECAP, ukuran butir rata-rata turun menjadi $\pm 75\mu\text{m}$ pada 1x laluan, $\pm 49.5\mu\text{m}$ pada 2x laluan dan $\pm 36\mu\text{m}$ pada 3x laluan. Penghalusan butir terjadi pada kedua bidang pengamatan X dan Y [6]. Mekanisme penghalusan butir ini masih relevan dengan persamaan *Hall-Petch* yang digunakan untuk memprediksi kekuatan luluh/yield pada material polikristal [11],[12],[5]. Persamaan *Hall-Petch* menyatakan bahwa tegangan yield suatu material polikristal sebanding dengan kuadrat akar dari ukuran butir ($d^{-1/2}$). Bentuk lengkap persamaan adalah $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$, dimana σ_y adalah tegangan luluh yang dibutuhkan untuk memulai tegangan alir (flow stress). Tegangan luluh pada logam akan meningkat akibat pengerjaan dingin dan akan meninggalkan tegangan sisa tekanan. Sedangkan σ_0 merupakan tegangan luluh karakteristik asli material tersebut. Persamaan ini telah dibuktikan untuk material berbutir besar ($d > 100\text{nm}$) [10].



Gambar 5. Struktur mikro Tembaga as received and as annealed dengan perbesaran 200 x
a. Sebelum ECA, b. Diproses ECAP rute B_c 1x laluan,
c. Diproses ECAP rute B_c 2x laluan d. Diproses ECAP rute B_c 3x laluan

Setelah di anneal gambar struktur mikro ditunjukkan oleh gambar 5 dengan perbesaran 200 X. Ternyata kekuatan luluh (YS) dan kekuatan tarik (UTS) meningkat tidak terlalu seperti yang terjadi pada sampel tanpa di-anneal. Peningkatan kekerasan tanpa di-anneal disebabkan oleh akumulasi *strain hardening*. Butir bisa dihaluskan pada sampel yang di-Anneal hingga ukuran $\sim 19.5\mu\text{m}$ 3x laluan dan $\sim 25.2\mu\text{m}$ pada 2 dan 1x laluan dari ukuran awal $\sim 28.6\mu\text{m}$ pada sisi X dapat dilihat pada Gambar 5.b,c dan d. Terlihat dari gambar 5, melalui perlakuan anneal sebelum diproses ECAP penurunan ukuran butir lebih tajam setiap laluan dibanding tanpa anneal. Hasil ini sejalan dengan pengujian

kekerasan Vicker untuk semua sampel, tetapi agak berlawanan dengan hasil pengujian tarik. Gambar 4.b memperlihatkan peningkatan kekuatan yang tidak setajam hasil proses ECAP tanpa anneal. Diperlukan klarifikasi dengan sampel yang lebih banyak. Sampel hasil uji tarik terlalu kecil dan standard yang dipakai adalah ASTM A-370 yang disetarakan untuk sampel kecil. Ukuran sampel terkecil menurut ASTM A-370 adalah berdiameter 4.25 mm. Pengujian ini hanya sanggup menghasilkan panjang total sampel uji tarik 25mm. Panjang daerah yang terdeformasi pada pengujian tarik akan mempengaruhi hasil uji tarik.

4. Kesimpulan.

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah:

1. Jumlah laluan sangat berpengaruh terhadap kekuatan, kekerasan dan ukuran butir tembaga murni komersial yang diproses dengan ECAP.
2. Peningkatan kekuatan masing-masing laluan dari kondisi as received adalah 35 %, 69 %, 87 % untuk 1,2, dan 3x laluan tanpa dianneal terlebih dahulu.
3. Peningkatan kekerasan masing-masing laluan dari kondisi as received 17 %, 50 % dan 57. % untuk 1, 2 dan 3x laluan pada sisi X sebelum dianneal. sedangkan pada tembaga yang dianneal terlebih dahulu terjadi peningkatan kekerasan berturut 38%, 57% dan 89%.
4. Untuk as received ukuran butir rata-rata turun menjadi $\pm 75\mu\text{m}$ pada 1x laluan, $\pm 49.5\mu\text{m}$ pada 2x laluan dan $\pm 36\mu\text{m}$ pada 3x laluan, sedangkan untuk yang dianneal dibanding as received berturut-turut untuk 1x, 2x dan 3 x adalah $\sim 28.6\mu\text{m}$, $25.2\mu\text{m}$ dan $\sim 19.5\mu\text{m}$
5. Kecepatan pembebanan sangat berpengaruh terhadap peningkatan sifat mekanik hasil proses ECAP.
6. Terbukti untuk proses ECAP pada tembaga sebaiknya di anneal terlebih dulu untuk mendapatkan peningkatan sifat mekanik yang lebih baik bila diproses dengan ECAP.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Nomor Kontrak: 005/SP3/PP/DP2M/II/2006 yang telah menyediakan dana untuk pelaksanaan penelitian. Kepada staff Laboratorium Teknologi Produksi di Toyohashi Institute of Technology yang telah membantu persiapan cetakan diucapkan banyak terima kasih. Penghargaan yang tidak terlewat kepada rekan-rekan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas atas dukungan moral sehingga makalah ini bisa diselesaikan. Adik-adik mahasiswa dan teristimewa saudara Muhammad Iksan yang telah membantu dalam persiapan sampel dan pelaksanaan pengujian tidak lupa diucapkan terimakasih.

6. 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 – 284.
- [2]. 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.
- [3]. Brady, George, Hendry, R.C., *Materials handbook; An Encyclopedia for Manager, Technical Professional, Purchasing and Production Managers, Technician, Supervisor, and Foremen*, 11th Edition, Mc.Graw Hill Book Company, New York, 1979.
- [4]. Joon-Yeon Chang, Jong Seo Yoon and Gyeung-Ho Kim, *Development of submicron sized grain during cyclic equal channel angular pressing*, Scripta Materialia, Volume 45, Issue 3, 13 August 2001, Pages 347-354.
- [5]. Stolyarov, V.V., Lapovok, R., et al, Mater. Sci. and Eng. (2003), in press
- [6]. Affi, J, Gunawarman, *Effect of Pass Number on Mechanical Properties and Microstructure of Commercial Copper Proceed by Ecap Route B_c*, Proceeding SNITM 2006, Surabaya, September 2006.
- [7]. Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Acta Mater. 46 (1998) 3317

- [8]. 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.
- [9]. Kim, H.S., Hong, S. I., Lee, H. R, Chun, B. S, *Process Modeling of Equal Channel Angular Pressing, in Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Edited by Zehetbauer, M, Valiev, R. Z. Wiley-Vch, Weinheim, 2004
- [10]. S.J. Oh, S.B. Kang, Sci. Eng. 278 (1999) 322.
- [11]. Dieter, G.E, *Metalurgi Mekanik*, Erlangga, Jakarta, 1986
- [12]. V.M. Segal, Mater. Sci. Eng. A 271 (1999) 322
- [13]. Krallics, G,Szeles,Z, Semenova, I.P.,Dotsenko,T.V., Alexandrov, I.V., *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, 2004
- [14]. Kim, J, Kim, I, Shin, D, H, *Development of Deformation Structures in Low Carbon Steel by Equal Channel Angular Pressing*, Scripta Materialia 45 (2001) 421-426
- [15]. Bascani, P, Tasca, L, Vedani, M., *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, 2004
- [16]. Valiev, R.Z, Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V, prog Mater, Sci. 2000;45;103
- [17]. Langdon, T.G, Furukawa, M., Nemoto, M., Horita, Z.,JOM 2000;52(4):103
- [18]. Chang, S.Y., Lee, K.S., Choi, S.H., Shin, D.H., Journal of Alloys and Compound 354 (2003) 216-220
- [19]. 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
- [20]. Hasegawa, H., Komura, S., Utsunomiya, A., Horita, Z., Furukawa, M., Nemoto, M., Langdon, T.G., Mater. Sci. Eng. A 265 (1999) 188.
- [21]. 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
- [22]. 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.
- [23]. Eka Winardi, Skripsi S-1, *Pengaruh Laluan pada Proses Ecap terhadap Stukturmikro dan Sifat Mekanik Material Tembaga Komersil*, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang, Oktober 2005
- [24]. Smith W.F, Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill, 1996