

PERLAKUAN PANAS PADUAN ALUMINIUM BERBUTIR HALUS *ULTRAFINE GRAINED* HASIL TEKNOLOGI *SEVERE PLASTIC DEFORMATION*

AGUS PRAMONO

Fakultas Teknik Jurusan Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jenderal Sudirman Km 3 Cilegon, Banten 42435, Indonesia
Email: agus.pramono@untirta.ac.id

ABSTRAK

Teknologi baru proses manufaktur dengan deformasi plastik berat, severe plastic deformation (SPD) telah berkembang pesat sebagai pengolahan logam dan paduan. Menggunakan tekanan tinggi dan lebih dari satu jenis gaya yang bekerja, maka akan menghasilkan butiran halus pada strukturmikro ultrafine grained (UFG). ECAP merupakan bagian dari metode SPD sebagai proses manufaktur pengolahan logam yang memiliki kemampuan untuk memperkenalkan penyempurnaan butiran halus yang signifikan untuk mencapai ukuran butir ke tingkat sub-mikrometer. Dalam aplikasi untuk pembuatan komponen maka diperlukan proses perlakuan panas pada material yang bertujuan untuk mengubah sifat material. Penelitian ini menerapkan perlakuan panas jenis anil dan T.6 (artificial aging) pada paduan logam aluminium dengan proses ECAP untuk aplikasi berbagai komponen engineering. Beberapa aluminium yang digunakan adalah; aluminium murni, aluminium seri 5 (Al5Mg), seri 6: AA6061 dan seri 7: AA7075.

Kata kunci: *severe plastic deformation, equal channel angular pressing, Anil, artificial aging dan aluminium.*

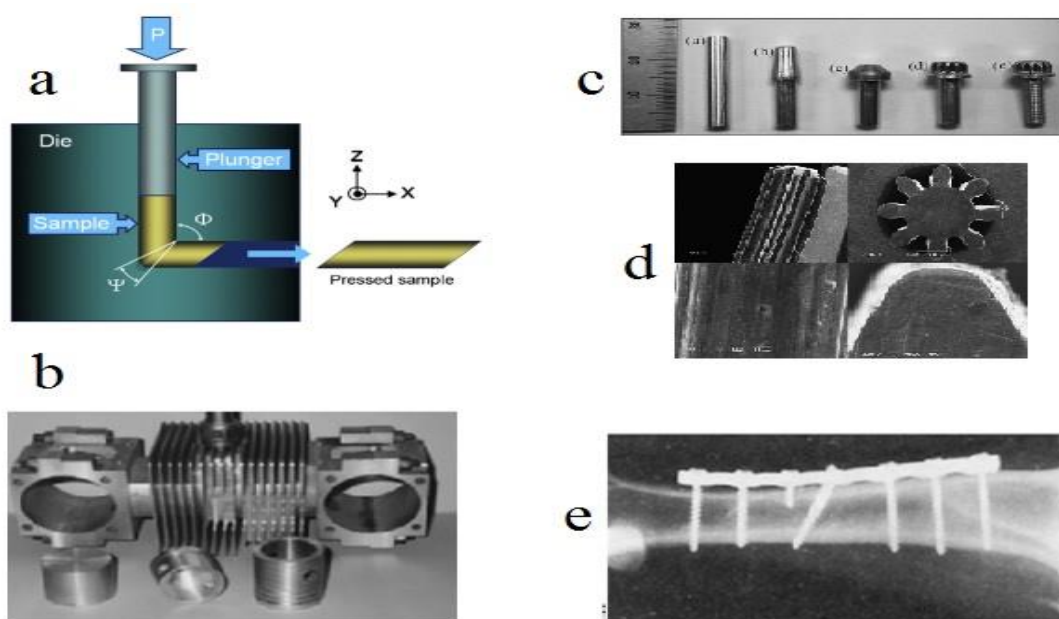
ABSTRACT

The new technology of manufacturing processes by severe plastic deformation (SPD) has been developed rapidly as processing metals and alloys. Using high pressure and more than one type of forces that works, it will produced ultrafine grained (UFG) structure. ECAP is one of the SPD method, a metal processing manufacturing process that has the ability to introduce significant fine-grained refinements on achieving grain size for sub-micrometer levels. In the applications of making components, heat treatment process is needed on materials that aim to change properties. This research applied of heat treatment annealing and t.6 artificial aging type for aluminum metal alloys by ECAP process on the application of various engineering components. Some of the aluminum used was; pure aluminum, aluminum (Al5Mg), AA6061 and AA7075.

Keywords: *severe plastic deformation, equal channel angular pressing, annealing, artificial aging and aluminum.*

1. PENDAHULUAN

Aluminium paduan sering digunakan dalam aplikasi di mana rasio kekuatan dan kepadatan tinggi diperlukan, untuk ketahanan terhadap pembebanan statis dan dinamis. Sifat dasar aluminium yang menggabungkan sifat ringan dengan sifat mekanik yang tinggi, banyak digunakan untuk aplikasi komersial seperti komponen pesawat terbang dan otomotif. Produksi struktur prima dengan menggunakan metode kerja logam konvensional seringkali mengalami kesulitan dalam prosesnya, terutama untuk produk masif atau massal. Proses pembentukan logam secara konvensional seperti tempa, ekstrusi, rolling, dan drawing dapat diterapkan batasan yang signifikan pada peralatan yang diperlukan serta karakteristik produk seperti kekuatan dan tekanan tinggi yang diperlukan di mana ukuran bagian kerja dibatasi dan perubahan terjadi dalam dimensi benda kerja dengan tingkat dan nilai regangan dalam produk. Keterbatasan ini dapat diatasi dengan teknologi terbaru dari proses manufaktur yaitu; *severe plastic deformation* (SPD) atau deformasi plastis berat. (Pramono, 2014). Teknologi baru proses manufaktur dengan deformasi plastik berat (SPD) telah berkembang pesat sebagai pengolahan logam dan paduan, menggunakan tekanan tinggi dan lebih dari satu jenis gaya yang bekerja, maka akan menghasilkan butiran halus pada struktur mikro *ultrafine grained* (UFG), sehingga material yang diproses akan mengarah pada peningkatan sifat mekanik. Teknologi utama yang muncul setelah tempa dan ekstrusi adalah equal channel angular pressing (ECAP), multi-axial forging (MAF), high pressure torsion (HPT) dan accumulative roll bonding (ARB). Untuk menghasilkan sifat mekanik yang tinggi pada SPD diperlukan siklus tekanan yang panjang. (Pramono, 2018). Diantara teknologi SPD proses pembuatan logam ECAP memiliki kemampuan untuk melakukan penyempurnaan butiran halus yang signifikan dalam jumlah besar. Biasanya, hal tersebut mengurangi ukuran sub-mikrometer, dengan demikian menghasilkan bahan yang mampu memberikan sifat fisik dan mekanik yang tinggi. Teknologi ECAP menggabungkan tegangan tarik dan tegangan tekan di dalam cetakan untuk menghasilkan produk dengan sifat yang lebih baik. Skema gambar ECAP dan berbagai aplikasi yang sudah diterapkan disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Equal channel angular pressing (ECAP); a) Skema perangkat ECAP b). Aplikasi ECAP untuk silinder mesin c). Aplikasi ECAP untuk mur-baut d). mini gear e). ECAP untuk bahan implant (Pramono, 2017).

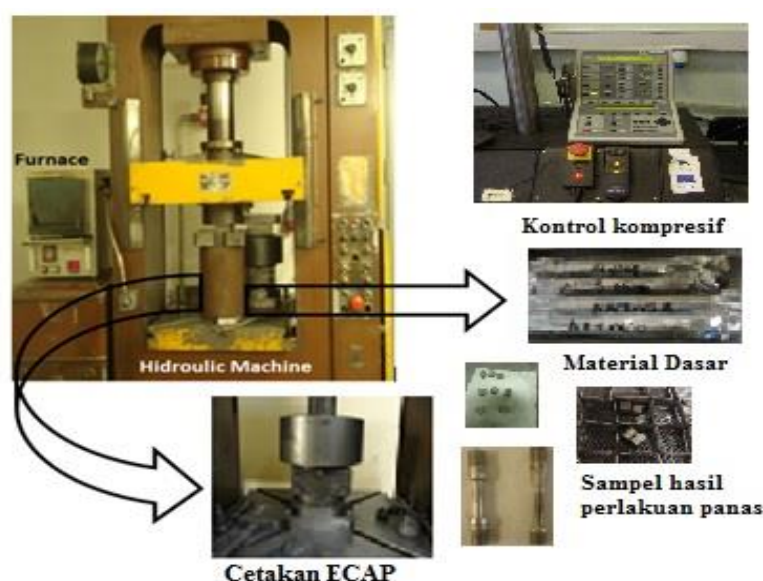
ECAP merupakan proses manufaktur untuk logam yang memiliki kemampuan untuk memperkenalkan penyempurnaan butiran halus yang signifikan untuk mencapai ukuran butir ke tingkat sub-mikrometer (mencapai ukuran $<1\mu\text{m}$). Dalam aplikasi untuk pembuatan komponen maka diperlukan proses perlakuan panas pada material yang bertujuan untuk mengubah sifat material. Perlakuan panas yang sesuai diantaranya adalah proses pelunakan anil untuk pengerjaan komponen dan perlakuan panas jenis T.6 (*artificial aging*) sebagai finishing proses untuk penerapan aplikasi. Perlakuan panas merupakan fabrikasi stabilitas termal untuk kehadiran fase endapan yang diharapkan agar logam mampu diproses untuk mengurangi ketegangan deformasi plastik berat selama proses pengerjaan maupun proses finishing, di mana pengendapan berlangsung bersamaan dengan rekristalisasi. **(Pramono, 2015)**. Penelitian ini menerapkan perlakuan panas pada paduan logam aluminium dengan proses ECAP untuk aplikasi berbagai komponen engineering. Beberapa aluminium yang digunakan adalah; aluminium murni, aluminium seri 5 (Al5Mg), seri 6: AA6061 dan seri 7: AA7075.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Bahan material untuk proses ECAP

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah; aluminium murni, paduan Al5Mg, AA6061 dan AA7075. Persiapan material menggunakan proses ECAP dilakukan pada tekanan ± 500 MPa dengan temperature operasional 300-450°C. Beberapa persiapan bahan yang dilakukan adalah:

- Persiapan pemotongan material disesuaikan dengan dimensi cetakan ECAP
- Setting* mesin ECAP dengan menggunakan pelumasan jenis grafit dan Mo_2Si .
- Proses pemanasan sampel bahan aluminium berlangsung selama 60-90 menit, tergantung dari durasi pemanasan mencapai angka temperatur yang sesuai dengan skala pembacaan *furnace*.
- Proses penekanan berlangsung selama 5-10 detik.
- Penekanan dilakukan dalam satu siklus tergantung capaian yang diinginkan.
- Pengeluaran sampel di dalam cetakan, setelah proses ECAP selesai.

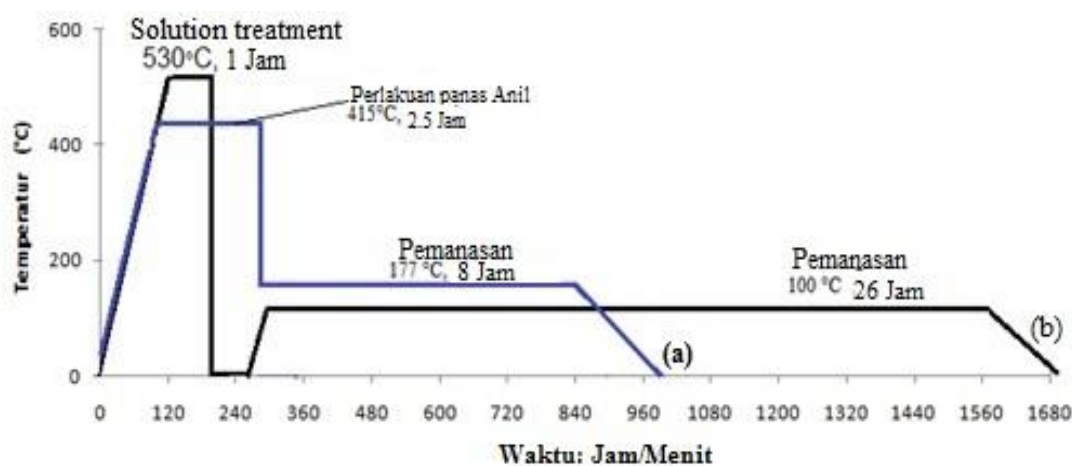


Gambar 2. Perangkat mesin ECAP dan prosedur operasional

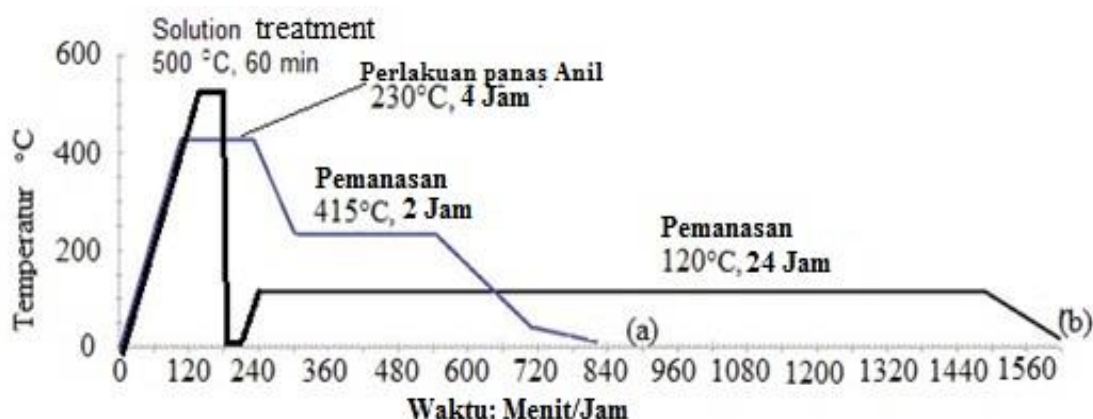
2.2 Perlakuan panas pada aluminium paduan

Bahan awal Al-5Mg, dipanaskan dalam tungku resistensi pada 300-450°C dengan waktu tahan 1 jam. Sampel diangkut ke cetakan ECAP selama 3 - 5 detik dan ditekan pada kecepatan 5 mm/s melalui sudut cetakan 90° untuk satu laluan *pass*. Untuk setiap *stopper* depan sampel sebagai tekanan balik digunakan. Tekanan berperan juga sebagai pemadatan. Perlakuan panas dilakukan untuk menemukan pengaruhnya pada paduan butir halus (UFG) yang sangat tegang. Proses anil bahan AA6061 dilakukan dengan memanaskan sampel hingga 415°C dan tahan selama 2,5 jam. Kemudian suhu diturunkan menjadi 177°C dan ditahan selama 8 jam. Perlakuan panas jenis *artificial aging* (T6) dilakukan pada 530°C selama 1 jam, quenching dan kemudian ditahan pada suhu 100°C selama 1 hari, seperti yang ditunjukkan pada skema gambar 3.

Proses anil pada bahan AA7075 dilakukan dengan memanaskan sampel hingga suhu 415°C dengan waktu tahan selama 2 jam. Kemudian suhu diturunkan mencapai 230°C dan ditahan selama 4 jam. Perlakuan panas T6 dilakukan dengan perlakuan panas solusi pada suhu 500°C selama 1 jam, dilanjutkan dengan pendinginan dan kemudian ditahan pada suhu 120° C, seperti ditunjukkan pada skema gambar 4.



Gambar 3. Perlakuan panas pada material AA6061 untuk operasional proses ECAP



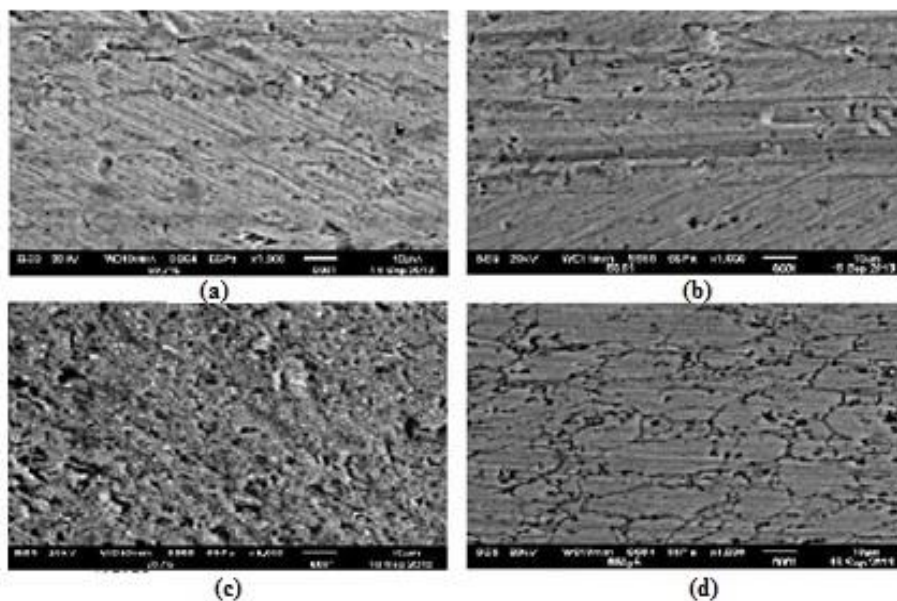
Gambar 4. Perlakuan panas pada material AA7075 untuk operasional proses ECAP.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aluminium memiliki peringkat pemakaian secara komersial di samping besi dan baja di pasar logam. Permintaan untuk aluminium tumbuh pesat karena kombinasi sifatnya yang unik yang membuatnya menjadi salah satu bahan rekayasa yang banyak diaplikasikan (**Isadarel, 2012**). Dalam banyak aplikasi, aluminium kini telah bergeser menjadi substitusi material besi dan baja, untuk menggantikan peran material logam besi dan baja. Faktor utama yang harus diperhatikan dalam peran substitusi adalah strukturmikro material, dimana butir pada strukturmikro harus mampu mencapai butir halus, *ultra-fine grained* (UFG) dengan rentang ukuran $<1\mu\text{m}$, dalam ukuran tersebut maka butir akan menunjukkan terjadinya perubahan morfologi yang seragam (**Valiev, 2004**).

3.1 Struktur Mikro Aluminium hasil proses ECAP

Hasil pemindaian scanning elektron mikroskop (SEM) dengan pembesaran 1000X menunjukkan distribusi strukturmikro yang halus pada aluminium murni, pada gambar 5.a logam murni tidak memiliki presipitat yang menghalangi ikatan butir sehingga butir cenderung lebih halus (**Pramono, 2014**). Jika dibandingkan aluminium paduan seperti Al5Mg : AA6061 dan AA7075 pada gambar 5. b-d, pada aluminium paduan memiliki distribusi butir yang tersebar diantara presipitat yang ada, meskipun Al-5Mg merupakan logam non *heat treatable*, tidak mampu dipanaskan sehingga tidak memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik secara signifikan.



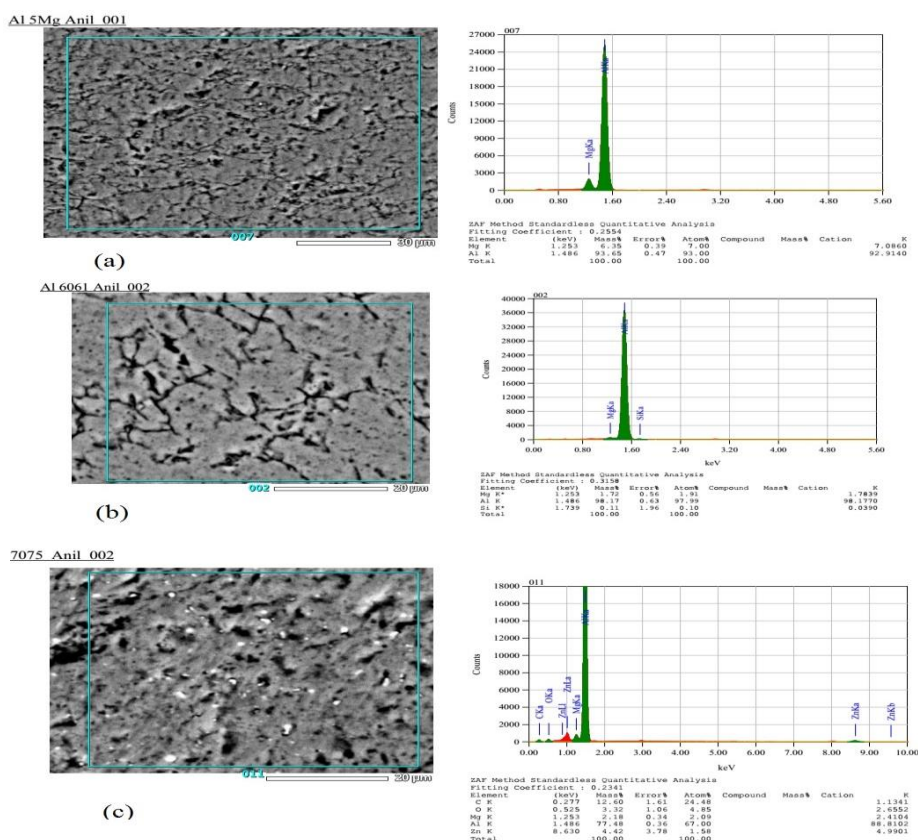
Gambar 5. Strukturmikro Paduan Aluminium hasil proses ECAP a). Aluminium murni b). Aluminium seri 6 (AA6061) c). Aluminium seri 7 (AA7075) d) Aluminium seri 5 (Al5Mg).

Pada penelitian yang dilakukan oleh **Ruslan Valiev, 2002-2009** Evolusi strukturmikro proses ECAP terbukti bahwa aluminium paduan akan memiliki butir halus, struktur UFG yang homogen setelah mendapatkan tekanan 4 laluan (*pass*). Teknik pengulangan penekanan pada SPD banyak digunakan untuk menghasilkan struktur butir UFG dalam logam dan paduan, terutama penerapan sebagai metode SPD berbasis laboratorium, karena memiliki beberapa keterbatasan, yang membatasi aplikasi industri. Pembatasan ini adalah karena intensitas kerja

dan efisiensi yang rendah dari metode ini, karena sejumlah siklus laluan pass mencapai 8-12 kali diperlukan untuk pembentukan struktur butir halus UFG (Valiev, 2009). Pada paduan AA6061 menghasilkan struktur butiran yang identik dengan struktur aluminium murni, terdapat pergeseran butir pada arah roll. Aluminium murni dan seri 6 (AA6061) memiliki kemampubentukan yang lebih baik, jika dibandingkan dengan paduan AA7075 gambar 5 c) dan Al5Mg pada gambar 5 d), presipitat yang berwarna hitam tersebar merata diantara matriks aluminium. Dalam artikel Kazeem, 2012. Menjelaskan faktor eksperimental yang paling signifikan yang mempengaruhi penghalusan butir pada proses ECAP adalah regangan total yang dikenakan di setiap laluan (*pass*). Sebagian besar hasil eksperimental ECAP yang dilaporkan dalam karya ilmiah sampai saat ini menyatakan bahwa nilai channel sudut digunakan dari 90° sampai 120° adalah yang paling ideal. Hal ini mempengaruhi terhadap kecepatan penekanan, karena pemulihan terjadi lebih mudah pada kecepatan lebih lambat.

3.2 Perlakuan panas anil pada aluminium

Pada Strukturmikro anil pada aluminium seri 5 (Al5Mg) menunjukkan butir halus dalam fase matriks Al yang tersebar secara merata di antara senyawa Mg5Al yang berwarna hitam sebagai presipitat, yang tersebar secara acak sebagai presipitat bentuk datar gambar. 6. (a). Setelah proses Anil terjadi pertumbuhan butir yang diikuti oleh pengurangan ukuran butir aluminium sebagai matriks, tetapi Mg5Al mengendap pada butir presipitat yang memiliki pembesaran. Anil pada suhu tinggi mengakibatkan partikel mengendap dan berinteraksi dengan batas butir yang tersisa (Pramono, 2018).

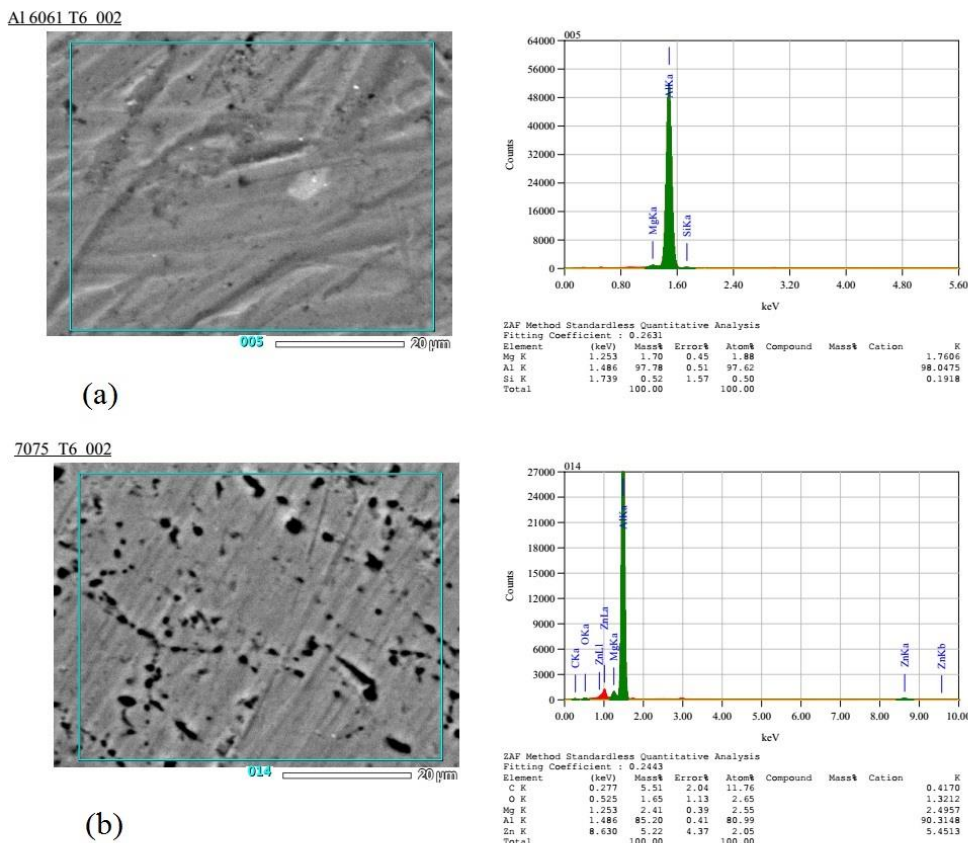


Gambar 6. Hasil perlakuan panas jenis anil a). Anil pada Al5Mg b). Anil pada AA6061 c). Anil pada AA7075.

Struktur mikro, butir halus dalam fase matriks Al telah tersebar merata di antara Mg_2Si sebagai presipitat, yang tersebar secara acak sebagai presipitat berbentuk bola. Diameter ukuran butir rata-rata adalah $0,1 \mu m$ (Gambar 6. a). Penemu metode ECAP **Vladimir Segal** dan mahasiswanya **Ferrasse, 1997** dalam eksperimennya telah menghasilkan ukuran butir halus mencapai $0,2 \mu m$. Paduan AA6061 yang diproses oleh ECAP memiliki ukuran butiran yang halus $< 1 \mu m$. Perbedaan khas dalam distribusi presipitasi Mg_2Si di seluruh struktur mikro dapat diamati pada kondisi perlakuan panas pada Gambar 6. b hasil dari anil dimana AA6061 dengan struktur butiran halus UFG akan stabil pada kondisi anil dan ini akan menyebabkan pengkasaran butir (*grains coarsening*). Hasil dari penghitungan butir pada proses annealing mencapai $9 \mu m$, butir ini termasuk kasar yang diikuti oleh pembentukan butir equiaxial dengan presipitat yang berada di sekitar batas butir. Setelah anil pada suhu tinggi, endapan partikel yang berdifusi akan berinteraksi dengan sisa batas butir. Selama anil terjadi kerapatan dislokasi yang berkurang akibat efek dari pemulihan dengan meningkatkan keuletan. Perlakuan anil sampel AA6061, merupakan pengendapan yang berlangsung bersamaan dengan rekristalisasi. Presipitat akan terus tumbuh dengan meningkatkan suhu anil dan memainkan peran penting untuk menstabilkan mikro pada suhu tinggi (**Jayaganthan, 2013**). Berdasarkan studi SEM struktur pada Gambar 6. c merupakan hasil endapan distribusi untuk setiap spesimen. Perbedaan mencolok dalam distribusi endapan $MgZn_2$ yang berwarna hitam maka di seluruh struktur mikro dapat diamati. Pada sampel yang terkonsolidasi terlihat presipitat yang terdistribusi secara merata.

3.3 Perlakuan panas T.6 (*Artificial aging*) pada aluminium

Perlakuan panas jenis T.6 merupakan jenis penuaan buatan/*artificial aging* untuk menghasilkan matriks larutan kesetimbangan padat yang mengandung partikel dari banyak deposisi kecil dan seragam (**Segal, 1997**). Kehadiran partikel fase kedua memberikan stabilitas termal untuk mikrostruktur berbutir halus (UFG) yang dihasilkan teknologi SPD, di mana menunjukkan percepatan penyempurnaan butiran yang dibawa oleh kehadiran fase kedua sebagai presipitat (**Pramono, 2015**). Perlakuan panas T.6 penuaan buatan pada AA6061 memberikan efek kepadatan dan kekasaran pada butir matriks aluminium dengan pencapaian ukuran butir $1 \mu m$ ditunjukkan pada gambar 7. Pemanasan mencapai $530^\circ C$ melarutkan semua endapan. Butir presipitat tersebut oleh fasa matriks yang terlihat memanjang daripada bentuk butir hasil proses anil. Presipitat sebagai partikel fase kedua memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas mikrostruktur dengan menjepit dan menghambat gerakan batas butir. Solusi perlakuan panas dengan penuaan buatan (T6) mengarah ke presipitat yang lebih halus dengan terdistribusi secara merata. Hasil proses ECAP pada paduan AA7075 memiliki ukuran butir rata-rata $0,7 \mu m$, jika dibandingkan dengan anil mencapai hingga $4,6 \mu m$, perlakuan T.6 menghasilkan ukuran butir $4.4 \mu m$, tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Berdasarkan artikel **Fritsch, 2012**. AA7075 rentan membentuk retakan internal sebagai akibat dari pemisahan mikro akibat presipitat $MgZn_2$ yang terdapat pada AA7075. Dibandingkan dengan jenis aluminium lainnya, AA7075 memiliki kemampuan pembentukan yang rendah, hal ini terlihat dari daktilitas yang rendah. Pembentukan retakan dibatasi oleh struktur mikro endapan presipitat elemen $MgZn_2$ yang biasanya membentuk pemisahan mikro, yang mengarah ke retakan ketika diproses.



Gambar 7. Hasil perlakuan panas jenis T.6 *artificial aging* a). T.6 pada AA6061 b). T.6 pada AA7075.

3.4 Perhitungan butir menggunakan perangkat lunak image-J

Pengukuran rata-rata butir menggunakan program perangkat lunak image-J yang telah dimuat ke perhitungan komputer menggunakan skala satuan micrometer. Kalibrasi ukuran piksel pada gambar menggunakan pembesaran 1000X, setelah penyesuaian Threshold kemudian mengukur besar dan lebar partikel yang dimaksudkan untuk melakukan fitur analisis partikel pada gambar. Selanjutnya, hasil gambar strukturmikro disusun, sehingga segmentasi menggunakan *threshold* akan lebih jelas mendefinisikan objek dan latar belakang butir yang akan ditelusuri. Dengan menggunakan alat analisis partikel dalam perangkat lunak Image J, diameter ukuran butir dapat diperoleh, asumsi area butir (A) berada dalam bentuk bulat seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 1, untuk memperoleh diameter partikel (d).

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

Berdasarkan area pengolahan citra partikel rata-rata yang dihitung menggunakan Analyze Partikel pada fitur gambar, sehingga dapat dihitung diameter rata-rata dengan menggunakan persamaan 1 dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1. Dalam tabel ditunjukkan bahwa partikel dengan analisis gambar, menghasilkan rata-rata diameter dengan pembesaran 1000x

Tabel 1. Hasil analisis ukuran partikel rata-rata dari sampel aluminium dengan pembesaran 1000x SEM menggunakan perangkat lunak image-J

Material	Luas partikel (μm^2)	Diameter Partikel (μm)	Luas partikel rata-rata (μm^2)	Diameter partikel rata-rata (μm)
Aluminium Murni	4.349	2.354	4.423	2.372
	4.070	2.287		
	4.850	2.485		
Al5-Mg	3.332	2.060	3.339	2.062
	3.496	2.110		
	3.188	2.015		
AA6061	4.636	2.430	4.623	2.427
	4.650	2.433		
	4.582	2.416		
AA7075	2.435	1.761	2.415	1.752
	2.150	1.655		
	2.659	1.840		

4. KESIMPULAN

Aluminium murni memiliki strukturmikro yang halus dikarenakan logam murni tidak memiliki presipitat, jika dibandingkan aluminium paduan seperti: Al5Mg, AA6061 dan AA7075 aluminium paduan memiliki distribusi butir yang tersebar diantara presipitat yang ada. paduan Al-5Mg merupakan logam non heat treatable, tidak mampu dipanaskan sehingga tidak memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik secara signifikan. Pada Strukturmikro anil pada aluminium seri 5 (Al5Mg) menunjukkan butiran halus dalam fase matriks Al yang tersebar secara merata di antara senyawa Al5Mg yang berwarna hitam sebagai presipitat, yang tersebar secara acak sebagai presipitat bentuk flat.

Paduan AA6061 menghasilkan struktur butiran yang identik dengan struktur aluminium murni, terdapat pergeseran butir pada arah roll. Aluminium murni dan seri 6 memiliki kemampubentukan yang lebih baik, jika dibandingkan dengan paduan AA7075 dan Al5Mg, hasil dari anil dimana AA6061 dengan struktur butiran halus UFG akan stabil pada kondisi anil dan akan menyebabkan pengkasaran butir. Struktur mikro, butir halus dalam fase matriks Al telah tersebar merata di antara Mg_2Si sebagai presipitat, yang tersebar secara acak sebagai presipitat berbentuk bola. Perlakuan panas T.6 penuaan buatan pada AA6061 memberikan efek kepadatan dan kekasaran pada butir matriks aluminium dengan pencapaian butir halus (UFG).

Paduan AA7075 menghasilkan endapan distribusi dengan perbedaan yang mencolok dalam distribusi endapan MgZn_2 yang berwarna hitam, pada sampel yang terkonsolidasi terlihat presipitat yang terdistribusi secara merata. Hasil proses ECAP pada paduan AA7075 memiliki ukuran butir halus, namun dalam proses pengerjaan paduan AA7075 rentan terhadap retakan internal sebagai akibat dari pemisahan mikro akibat presipitat MgZn_2 . Dibandingkan dengan jenis aluminium lainnya, AA7075 lebih rendah pada kemampuan bentuk, hal ini akan menghasilkan daktilitas yang rendah. Pembentukan retakan dibatasi oleh struktur mikro endapan presipitat elemen MgZn_2 yang biasanya membentuk pemisahan mikro, yang mengarah ke retakan ketika diproses.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima Kasih kepada Prof. Renno Veinthal yang telah banyak memberikan ilmu dan praktek laboratorium *severe plastic deformation*, serta Dr.-tech Lembit Kommel, selaku Direktur Saturn-Lylka Moscow, Perusahaan pembuat komponen perangkat kemiliteran. Penelitian ECAP ini merupakan bagian dari side-project "Nano-Com" *receiving funding from the European Regional (Social) Fund under project number: 3.2.1101.12-0010.*

DAFTAR RUJUKAN

- Agus Pramono, Lauri Kollo, Kaspar Kallip, Renno Veinthal, Jaana-Kateriina Gomon. (2014). *Heat treatment of ultrafine grained high-strength aluminum alloy*, Key Engineering Materials. 604. Pp. 273-276.
- Agus Pramono, Alry Mochtar Jamil and Anistasia Milandia (2018). *Aluminum based Composites by Severe Plastic Deformation Process as New Methods of Manufacturing Technology*. MATEC Web of Conferences. Vol. 218, 04011. Pp. 1-9.
- Agus Pramono, Lauri Kollo, Kaspar Kallip, Renno Veinthal, Jaana-Kateriina Gomon. (2015). *Heat Treatment of Ultrafine Grained AA6061 Consolidation by Equal Channel Angular Pressing*. Applied Mechanics and Materials. 771. Pp. 252-256.
- Agus Pramono, Lauri Kollo, Kaspar Kallip, Renno Veinthal, Jaana-Kateriina Gomon. (2014). *Processing Nano Powder Aluminum by Equal Channel Angular Pressing Consolidation*. Proceeding toward sustainability and quality of life. Vol 1. 2014. pp. 66-72.
- Agus Pramono, Anistasia Milandia, Kurnia Nugraha and Moch Fawaid (2017). *Aluminum alloys by ECAP Consolidation for Industrial Application*. Vanos-Journal of Mechanical Engineering Education. Vol 2. No. 2. Pp. 117-126.
- Isadare I. A. D. (2012). Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminum alloy, Mat. Res. vol.16 no.1: Print version ISSN 1516-1439
- Ruslan Z. Valiev. (2004). Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. Nature materials, Vol. 3 pp. 511-516.
- Ruslan Z. Valiev, Maxim Yu. Murashkin, Elena V. Bobruk and Georgy I. Raab. (2009). Grain Refinement and Mechanical Behavior of the Al Alloy, Subjected to the New SPD Technique. Materials Transactions, Vol. 50, No. 1. pp. 87 to 91.
- Kazeem O. Sanusi, Oluwole D. Makinde. Graeme J. Oliver (2012). Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures. S Afr J Sci (South African Journal of Science). Vo. 108 pp. 1-7.
- Agus Pramono, Lauri Kollo, Lembit Kommel and Renno Veinthal (2018) High-Strength Aluminum Alloy of Ultrafine Grained by Consolidation-ECAP. The 2nd Mineral Processing and Technology International Conference (MINEPROCET'18). Committee of Research Division for Mineral technology Indonesian Institute of Sciences Jl. Ir. Sutami km. 15 Tanjung Bintang 35361 Lampung Selatan. 1 – 2 November 2018 in Bumi Serpong Damai (BSD).

- S. Ferrasse, V. M. Segal, K. T. Hartwig, R. E. Goforth. (1997). Development of a sub-micrometer grained microstructure in aluminum 6061 using equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Research Society* 12(5) pp. 1253 – 1261.
- P. N. Rao, D. Singh, R. Jayaganthan. (2013). Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of al6061 alloy processed by cryorolling. *Materials Science and Technology* 29(1) pp. 76-82.
- S. Fritsch, M. Scholze, M.F.-X. Wagner. (2012). Cryogenic forming of AA7075 by Equal-Channel Angular Pressing. *Material wissen schaft und Werkstoff-technik (Materials Science and Engineering Technology)*, Volume 43, Issue 7. pp. 561–566

